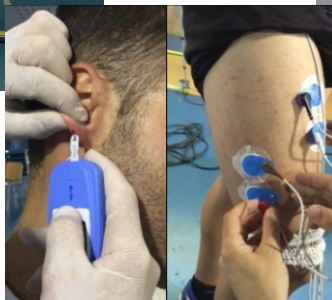
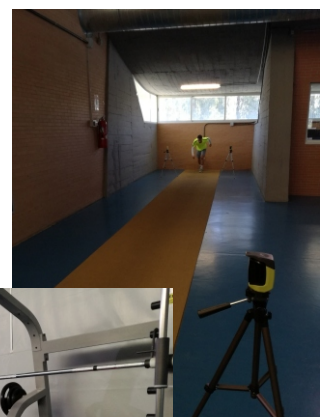
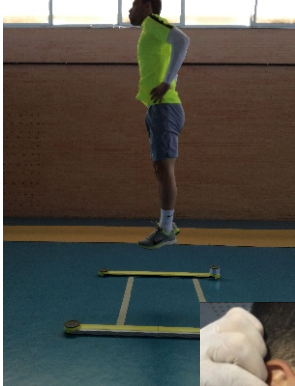




**UNIVERSIDAD PABLO DE OLAVIDE  
DEPARTAMENTO DE DEPORTE E INFORMÁTICA**

# **LA VELOCIDAD DE EJECUCIÓN COMO VARIABLE PARA EL CONTROL Y LA DOSIFICACIÓN DEL ENTRENAMIENTO Y COMO FACTOR DETERMINANTE DE LAS ADAPTACIONES PRODUCIDAS POR EL ENTRENAMIENTO DE FUERZA**

## **MOVEMENT VELOCITY AS A CRITICAL VARIABLE FOR PRESCRIBING AND MONITORING RESISTANCE EXERCISE, AND AS A DETERMINANT FACTOR OF THE RESISTANCE TRAINING INDUCED-ADAPTATIONS**



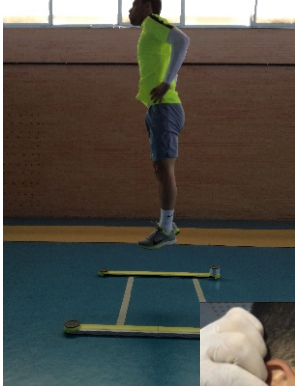
**Tesis Doctoral  
David Rodríguez Rosell  
Sevilla, 2017**



**UNIVERSIDAD PABLO DE OLAVIDE  
DEPARTAMENTO DE DEPORTE E INFORMÁTICA**

# **LA VELOCIDAD DE EJECUCIÓN COMO VARIABLE PARA EL CONTROL Y LA DOSIFICACIÓN DEL ENTRENAMIENTO Y COMO FACTOR DETERMINANTE DE LAS ADAPTACIONES PRODUCIDAS POR EL ENTRENAMIENTO DE FUERZA**

## **MOVEMENT VELOCITY AS A CRITICAL VARIABLE FOR PRESCRIBING AND MONITORING RESISTANCE EXERCISE, AND AS A DETERMINANT FACTOR OF THE RESISTANCE TRAINING INDUCED-ADAPTATIONS**



**Tesis Doctoral  
David Rodríguez Rosell  
Sevilla, 2017**



UNIVERSIDAD  
**PABLO<sup>D</sup>  
OLAVIDE**  
SEVILLA

**Universidad Pablo de Olavide**

Facultad del Deporte  
Departamento de Deporte e Informática

## **TESIS DOCTORAL**

***La Velocidad de Ejecución como Variable para el  
Control y la Dosificación del Entrenamiento y  
como Factor Determinante de las Adaptaciones  
Producidas por el Entrenamiento de Fuerza***

Tesis para optar al grado de *Doctor Europeo* presentada por:

**David Rodríguez Rosell**

Director

**Dr. Juan José González Badillo**







UNIVERSIDAD  
**PABLO<sup>D</sup>  
OLAVIDE**  
S E V I L L A

**Universidad Pablo de Olavide**

Facultad del Deporte  
Departamento de Deporte e Informática

## **TESIS DOCTORAL**

***La Velocidad de Ejecución como Variable para el  
Control y la Dosificación del Entrenamiento y como  
Factor Determinante de las Adaptaciones Producidas  
por el Entrenamiento de Fuerza***

DOCTORANDO

**David Rodríguez Rosell**

DIRECTOR

**Dr. Juan José González Badillo**

Sevilla, Junio de 2017





## **Universidade da Beira Interior**

December 15th, 2016

### **TO WHOM IT MAY CONCERN**

MÁRIO ANTÓNIO CARDOSO MARQUES, with National Identity Document 07985979, certify that PhD candidate on the European Doctorate program, David Rodríguez Rosell, successfully has completed 3 months research work in the Faculty of Sport of the University of Beira Interior (Covilhã, Portugal).

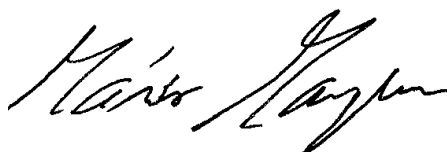
I hereby attest that David Rodríguez Rosell have stayed and worked extensively during the period of 1st of September 2016 to 15th of December 2016 at the Research Laboratory of the Faculty of Sport, where he together with Ricardo Mora Custodio, me and my colleagues have carried out three research projects entitled:

1. The acute effect of different resistance training protocols determined by the velocity of the first repetition and the velocity loss over the set on the mechanical fatigue and metabolic stress.
2. The acute effect of interrepetition rest interval on mechanical and metabolic fatigue during the bench press exercise.
3. Reliability of different kinetic and kinematic variables during a progressive isoinertial loading test in the bench press exercise

In addition to these research projects, we have discussed about other potential projects of collaboration we have in common, which we will seek to develop in the future. Furthermore, David Rodríguez Rosell have participated and contributed actively to our research seminars providing a number of scientific lectures that have described selected parts of his previous scientific works performed in the Physical Performance & Sports

Research Center (Pablo de Olavide University). Finally, during his stay David Rodríguez Rosell has demonstrated a high level of scientific knowledge combined with an extensive practical experience with important applied aspects related to the training and physiology of sports and exercise. Therefore, I can only say that it has been a true pleasure to have David stay and work in our Faculty.

Sincerely,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Mário A. Cardoso Marques', with a stylized, cursive script.

Mário A. Cardoso Marques

R. Marquês D'Ávila e Bolama, 6201-001 Covilhã, PORTUGAL  
Telef.: +351 275 319 716 | Fax: +351 275 319 737 | Linha Azul: 808 200 105  
E-mail: s.academicos@ubi.pt | [www.academicos.ubi.pt](http://www.academicos.ubi.pt)

*A (con el permiso de toda mi familia) Juan José González Badillo,  
por cambiar el rumbo de mi vida.*





## ~ Agradecimientos ~

Ahora que está tan cerca la consecución de un logro tan importante para mí como es la de alcanzar el grado de *Doctor en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte*, es oportuno, preciso y casi obligatorio echar la vista atrás para reconocer el camino y a las personas que me han acompañado hasta llegar aquí. Sería muy presuntuoso por mi parte pensar que soy el principal artífice de este trabajo, cuando la realidad es que sólo soy un pequeño eslabón más de todo el *engranaje* de buenas personas que se ha formado a mi alrededor para que yo funcione, personas a las que les debo todo lo que he conseguido. Cuando comencé a redactar la presente Tesis, tenía tantas ganas como miedo de que llegara el momento en el que tuviera que darle las gracias a todas esas personas a las que quiero, porque intuía que este apartado podría hacerse tan largo o más que la propia Tesis, pero sobre todo porque era consciente de que no iba a ser capaz de expresar con palabras todo lo que siento por ellos. Por eso, me gustaría pedirlos disculpas por adelantado por si en mi ánimo por manifestar mi agradecimiento no logro elegir las palabras adecuadas.

Es importante decir aquí que la *secuencia* en la que cito a las personas que, de un modo u otro, han contribuido a la realización de este trabajo no implica, obligatoriamente, *orden de importancia*, dicho orden es consecuencia de que no puedo nombrar a todos a la vez, pero por todos siento un especial afecto. Sin más, quisiera darles las gracias.....

A **Juan José González Badillo**, por ser el precursor, el motor, el principio, el medio y el fin de todo esto. Tú, por encima de la velocidad de ejecución, has sido y eres la auténtica referencia para la programación, el control y la evaluación del entrenamiento de fuerza. En todo este proceso yo solo he puesto mi tiempo y mi ilusión, el resto es todo merito tuyo. Desde el día que te escuché por primera vez en la primera clase de la asignatura *Bases del Acondicionamiento Físico* me dije "*yo quiero ser como él*". Después de tantos años trabajando a tu lado, de tantas *clases particulares* sobre entrenamiento de fuerza, fisiología, estadística, biomecánica e incluso lingüística, y después de interminables horas de *discusión*, me doy cuenta de que fui demasiado osado. Me puse una meta que jamás podré alcanzar, y no solo por la dimensión de tus

conocimientos, también por tu infinita bondad y humildad. Jamás he conocido a una persona que reúna tantas cualidades admirables y que tenga tanto equilibrio entre ellas. Ahora que veo las cosas con otra perspectiva, me conformo con haber aprendido de ti lo suficiente como para que te sientas orgulloso de mí y de mi trabajo, y que no tengas la sensación de que perdiste el tiempo en mi formación. Algún día, todos sabrán (como yo y mis compañeros sabemos) que hubo un *antes* y un *después* en la *Metodología del Entrenamiento Deportivo* y que eso fue gracias a ti. Aunque sé que no lo necesitas, mi único afán de cada día, de cada trabajo que realizamos y de cada artículo que publicamos es lograr ese reconocimiento, porque una vida entera dedicada *a los demás* merecen todo mi esfuerzo. Gracias por darme la oportunidad de trabajar contigo, por creer en mí y por darme la confianza para poder dar luz a las inquietudes que tú mismo me creaste. Gracias también por aportarme tanto conocimiento de manera tan desinteresada.

A mis padres, ***Cristóbal Rodríguez Armario*** y ***Ángeles Rosell Morales***, por encender en mi corazón la llama de la vida y no dejar que nunca se apagara. Parafraseando a Gabriel García Márquez "*las personas más inteligentes que he conocido en mi vida apenas sabían leer ni escribir*", porque casi sin recursos económicos y con poco más que estudios primarios supisteis darme (a mí y a mis hermanos) todo lo que necesitaba, me inculcasteis los valores de esfuerzo, amor y constancia, y a vuestra callada manera, siempre me guiasteis por el camino correcto. Sé que no fui lo que se dice un *niño fácil*, pero vosotros no os rendisteis y me enseñasteis que, con respeto y humildad, podría conseguir lo que me propusiera. Puede ser que a veces no supierais muy bien a qué me dedicaba o en qué invertía tantas horas de mi vida, pero entendisteis perfectamente la importancia que esto tenía para mí y siempre sentí vuestro aliento y vuestro apoyo, sobre todo en los peores momentos. Gracias por no dudar de mí y darme la oportunidad de elegir, de ser y de hacer lo que quise en cada momento. Os quiero.

A mis hermanos, porque desde que nací habéis cuidado de mí, me habéis protegido y, junto con mamá y papá, me habéis educado y *soportado*. No decidí que fuerais mis hermanos, pero si volviera a nacer y me dieran la oportunidad de elegir, no dudaría ni un instante en volver a crecer entre vosotros, aunque para ello tuviera que sacrificar todo lo que he vivido hasta ahora. Sinceramente, para mí no hay mayor orgullo que

poder decir que soy vuestro hermano. Por eso, siento la obligación de agradecerlos personalmente:

- A mi hermana **Esther**, mi Tata, por ser mi hermana, mi amiga y mi confidente. Cuando ya no tenía a nadie a quien recurrir, donde nadie podía llegar, allí estabas tú. Tú siempre sabías, con sólo mirarme, cuando algo me preocupaba y eras capaz de remover cielo y tierra por cambiar mi tristeza por una sonrisa. Me inculcaste la afición por *leer* y ver *pelis*, y durante mis años de *Licenciatura* fuiste capaz de *silenciar* e incluso *echar* a tu marido de su propia casa para que yo pudiera estudiar tranquilamente. Siento haberte dejado *abandonada* durante tantos *cafés*, tantas tardes de paseo y reuniones familiares por esta Tesis. Espero que sepas perdonarme.
- A mi hermana **Alicia**, porque desde que nací me diste tantos besos, tantos *bocados* y tantos abrazos que ya no puedo vivir sin ellos. Contigo aprendí que a veces es necesario (dentro de unos límites) ser rebelde y tener arrojo para conseguir lo que quieres. Siempre has sido una luchadora y muchos de los *privilegios* que mamá y papá me han concedido han sido porque tú los peleaste. Gracias por recordarme cada día que la sonrisa es la mayor *arma* que podemos tener para ser feliz y hacer felices a los demás.
- A mi hermano **Eduardo**, porque cada pelea que teníamos cuando éramos *enanos* no era más que una forma de manifestarte lo mucho que te envidiaba. Eras más inteligente, me ganabas en todos los juegos, tenías más amigos, jugabas mejor que yo al fútbol, e incluso, todo el mundo decía que tú eras más *mono*. En realidad, lo que deseaba decirte con cada *puñetazo* que te daba (y que recibía) era que te quería, pero tú sabes que con esa edad no se dicen esas cosas. Admiro tu valentía, tu determinación para lograr algo y tu visión y forma de afrontar la vida. Yo también soy de los que piensan que *ojalá pueda ser como tú cuando sea mayor*. Aunque me apasiona la investigación, nunca he tenido mayor motivación por aprender, ni hay nada que le haya dado tanto sentido a mis interminables horas de trabajo que poder ayudarte a recuperarte de tus lesiones. Verte de nuevo *sano* y haciendo todo aquello que te hace feliz es mi mayor logro. Muchas gracias por ayudarme a poner la primera *piedra* de este trabajo.

A **Teresa Morán**, la médico que ha sido capaz de curar todas aquellas dolencias que no se ven pero que se sienten en lo más profundo del corazón. Tú mejor que nadie has sentido y sufrido conmigo durante estos cuatro años. Me has visto reír y llorar a partes iguales, has sabido mantenerme en un estado de mesura a pesar de todo lo vivido, y has sabido aguantarme pacientemente cuando parecía que yo solo tenía *ojos* para la *Ciencia*. Cuando todo se volvía en mi contra, tú me dabas las fuerzas que me faltaban para seguir caminando, a pesar de que yo sabía que estabas padeciendo tanto o más que yo mis problemas. No sé si tendré tantas vidas como para demostrarte lo que significas para mí. Es cierto que he invertido mucho más tiempo en este trabajo que en nosotros, pero como tú misma me dijiste una vez, lo mejor de mí no se lo ha llevado la Tesis, eso lo tengo guardado para ti. Te quiero.

A mi sobrino **Alejandro**, por llenarme de ilusión cada día. Saber que estabas esperándome para darme un abrazo cuando yo llegara a casa, sea la hora que fuera, era de las pocas cosas que me daban fuerzas para seguir adelante. Solo te pido disculpas si no estuve presente en todos los momentos en los que tú me necesitaste a mí.

A mi cuñado **José Cabrera**, Pepe, por hacerme sentir que podía contar contigo para todo lo que necesitara, y por cuidar de mi Tata incluso mejor de lo que yo lo hubiera hecho. Nunca olvidaré nuestro viaje a Madrid en el que me enseñaste a *hacer bulto* y en el que aprendí que los *legones* existen.

A mis grandes amigos **Juan Manuel Yáñez** (El Careca de Bonares) y **Ricardo Mora** (la Masa de Ayamonte), porque siempre que los necesité no tuvieron ningún reparo en dejar sus vidas a un lado y dedicarse en cuerpo y alma a todo aquello que fuera preciso. No importaba el tiempo, el esfuerzo o el dinero que fuéramos a invertir, ellos solo pensaban en ayudarme y en *empujarme* a seguir adelante, porque por encima de cualquier cosa nos unía y nos une la AMISTAD, de esa que se escriben con mayúsculas. Saber que contaba con vosotros me daba la tranquilidad, la seguridad y la confianza de que todo era posible y de que todo iba a salir bien. Como sabéis, esto es más vuestro que mío, así que sólo puedo daros las gracias y la enhorabuena por todo lo que habéis hecho.

A mi gran amigo **Julio Torres**, o como yo le llamo, *Richard*, por regalarme tantos y tantos momentos de alegría, de risas, de felicidad y de consuelo. No sabría enumerar en

tan poco tiempo y espacio todas aquellas cosas en las que he intentado imitarte para ser mejor personas y profesional: humildad, sacrificio, esfuerzo, constancia, dedicación... Como ya te he dicho en alguna ocasión, saber que nos íbamos a encontrar en clase fue durante muchos días (e incluso años) el único motivo porque el que me despertaba para ir a la Universidad durante nuestros años de *Licenciatura*. Gracias por contagiarme tu entusiasmo y tu optimismo, por dejarme ser tu amigo y por tener más fe que yo en las cosas que yo mismo hacía. Richard, sabes perfectamente que sin ti nada de esto hubiera sido posible.

A **Fernando Pareja**, porque juntos iniciamos el camino que nos ha conducido hasta aquí. Sin más recursos que nuestra ilusión y nuestras ganas de aprender comenzamos a trabajar día y noche sin descanso y demostramos, sobre todo a nosotros mismos, que éramos capaces de realizar trabajos serios y de calidad a pesar de nuestra juventud. Durante muchos años tuve el placer de aprender a tu lado. Gracias por colaborar en gran parte de los estudios que componen esta Tesis.

A **Miguel Sánchez** y **Beatriz Bachero**, por mostrarme su apoyo e interés constante y animarme cada día a continuar hacia delante.

A mi amigo **Juan Manuel Bedoya**, porque desde que nos conocimos cuando teníamos 4 años nunca me has abandonado y siempre te has preocupado y te has ofrecido a ayudarme en todo lo que yo hacía. Hemos compartido tantas cosas que a veces ya no sé si considerarte un amigo o un hermano.

A mis amigos **Felipe Franco** (El auténtico *Misifú* de Coria) y **José Manuel González** (Chemi), porque desde que nos conocemos no ha pasado ni un día en el que no haya sentido vuestra confianza y vuestro apoyo para afrontar este reto. Espero algún día poder transmitirlos la fuerza que vosotros me habéis dado durante estos años.

A **Modesto Luceño**, por su ayuda y su apoyo constante e incesante. Porque, a pesar de nuestra corta amistad, nunca dudó en entregarme todo el cariño que una persona puede ofrecer, porque así lo sentía y yo así lo recibía. Sus experiencias, sus vivencias y sus reflexiones sobre la ciencia y la vida siempre me ofrecían un punto de vista diferente que yo no alcanzaba a ver. Conocerle supuso un punto de inflexión en mi vida personal y profesional. Gracias también por ayudarme a descubrir una de las pasiones de mi vida, *la montaña*. Ojalá te hubiera conocido mucho antes.

A **Luis Sánchez Medina**, por transmitirme tu pasión por el trabajo bien hecho y por hacerme ver que lo importante es la *calidad* de lo que hagas y no la *cantidad*. Tus trabajos junto a Juan José me han servido de apoyo, de base, de inspiración y de motivación para continuar por el camino que tú iniciaste.

A **Juan Ribas**, porque, en todos estos años desde que te conocí, no recuerdo ningún día en el que no hayas atendido mi llamada o mi visita, a pesar de las muchas ocupaciones que tienes y de las muchas veces que te *solicité*. Siempre estuviste disponible y siempre me diste una solución y una explicación cuando me inundaban las preguntas sobre distintos procesos físicos y fisiológicos. Las conversaciones que teníamos en tu despacho o en cualquier sitio en el que yo te abordara eran una revelación inequívoca de que mis conocimientos eran *ridículos*, pero a la vez me transmitían las ganas de seguir aprendiendo. Para mí era impresionante ver el entusiasmo que ponías en intentar resolver todas mis dudas y en exponerme los proyectos que estabas realizando y los que tenías pensado realizar. Por supuesto, mil gracias por poner a nuestra disposición, sin condiciones y sin fecha de caducidad, todos los recursos necesarios para llevar a cabo los registros de electromiografía en la presente Tesis.

A **Mario Marques**, el *fenómeno* de Oporto, por tu disponibilidad para acogerme en tu grupo de trabajo, por poner todos tus recursos personales y materiales a mi disposición y por ofrecerme todo lo que fuera necesario para que mi estancia en la Universidade da Beira Interior (Covilhã, Portugal) fuera la mejor posible. En esos tres meses conseguiste que viviera una experiencia personal y profesional inolvidable e inigualable. Desde la primera vez que contacté contigo me trataste como si me conocieras de toda la vida y eso me hizo sentir que estaba en el lugar correcto.

A **Daniel Marinho** y **Henrique Neiva**, porque desde el primer día que llegué a Covilhã me hicisteis sentir como si estuviera en mi propia casa. Compartir despacho, reuniones, conversaciones de trabajo (y otras cosas), entrenamientos, vestuario, cenas y risas con vosotros fue más que satisfactorio.

A **Tomás Alfaro Lama**, por ayudarme en aquellos años (posiblemente los más difíciles) en los que yo no sabía qué hacer con mi vida. Me cogiste de la mano y me ayudaste a levantarme. Me enseñaste que había segundas oportunidades y que tenía que estar preparado para *agarrarlas* el día que llegaran. Eso nunca lo olvidaré.



A **Blas Torres Ruiz**, por darme la oportunidad de acercarme a la investigación y confiar en mí cuando aún era un *neonato* que nada sabía sobre las propiedades activas y pasivas de las motoneuronas. Para mí, *Reobase* o *Ganancia* eran términos más relacionados con la economía que con la fisiología. Nunca olvidaré que el concepto de *ósmosis* también se puede aplicar al *transvase* de *conocimientos*. Me gustaría hacer extensible también este agradecimiento a todo el grupo de personas con las que trabajé durante mi *aventura* en el campo de la neurociencia, especialmente a **Livia Carrascal**, **María Luisa Álvarez** (Mawi) y **Luis Herrero**, de las que tanto aprendí y disfruté.

A **Esteban Gorostiaga** y a todas las personas que trabajan en el Centro de Estudios, Investigación y Medicina del Deporte de Navarra, por poner a mi disposición y a la de mi compañero Fernando Pareja, todos los recursos materiales que fueron necesarios durante nuestra estancia en Pamplona. Gracias a **Luis**, **Ibai** y **Fabricio** no llegué a extrañar el *calor* de mi tierra.

A **José Antonio López Calbet** y a todo su grupo de trabajo en el Laboratorio de Rendimiento Humano de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, especialmente a **Ismael Pérez**, **David Morales**, **José Lozas** y **Arima**, por darme la oportunidad de trabajar con ellos y dedicar tanto tiempo y esfuerzo en enseñarme las técnicas para la medición y análisis de fibras musculares y señalización muscular. La experiencia acumulada en esos meses de trabajo junto a ellos ha sido fundamental para poder desarrollar los estudios que componen esta Tesis.

A **Antonio Ravelo**, por ofrecerme su ayuda incondicional prácticamente sin conocerme de nada y sin pedir nada a cambio. Sin sus conocimientos sobre programación para el análisis de señales biológicas hubiese sido imposible poder llevar a cabo el análisis de los registros de electromiografía en la presente Tesis. Tuvo la paciencia necesaria para enseñarme cuál era la diferencia entre las señales *estacionarias* y *no estacionarias*, y para escucharme en las muchas ocasiones en las que le *molesté* para que modificara el *Script*.

Como no podía ser de otra manera, quisiera darle las gracias a todas las personas que se ofrecieron voluntarios para participar en cada uno de los estudios que componen esta Tesis, especialmente a **Fran Padilla** (El Presi), **Sergio Cuartero**, **Raúl Mora**, **Héctor Espí**, **Alberto Moreno**, **Miguel Parreño** y **Álvaro Bohórquez**. Admiro vuestra valentía

y vuestras ganas de ayudar y colaborar conmigo en todo lo que fuera necesario, a pesar de que yo cada día os exigía y os *maltrataba* físicamente. Sin vosotros, nada de esto hubiera sido posible.

Por último, quiera tener unas palabras de agradecimiento para todas las personas e instituciones que desde que nací me han hecho la vida más *difícil*. Reconozco que recibir su *falta de humanidad* y su *rechazo* no fue grato para mí, pero, sin saberlo, ellos me dieron las ganas y la *rabia* necesaria para seguir adelante y poder llegar hasta aquí.

Sinceramente,

***¡MUCHAS GRACIAS A TODOS!***

## PUBLICACIONES Y DIVULGACIÓN DE LOS RESULTADOS

---

Fruto del trabajo llevado a cabo en la presente Tesis Doctoral, se ha publicado un artículo, un libro y se han realizado varias aportaciones en Congresos. Además, se ha llevado a cabo una Estancia de Investigación en la *Facultade do Desporto* de la *Universidade da Beira Interior* (Covilhã, Portugal).

Artículos publicados en revistas científicas internacionales (*JCR*):

- González-Badillo, J. J., Yáñez-García, J. M., Mora-Custodio, R., & **Rodríguez-Rosell, D.** (2016). Velocity loss as a variable for monitoring resistance exercise. *Int J Sports Med*.

Comunicaciones presentadas en forma de Póster:

- **Rodríguez-Rosell, D.**, Yáñez-García, J. M., Mora-Custodio, R., Pareja-Blanco, F., González-Badillo, J. J. Efecto de la pérdida de velocidad dentro de la serie durante el entrenamiento de fuerza sobre la fuerza muscular, la capacidad de salto y el rendimiento en sprint. Simposio EXERNET. Investigación en ejercicio, salud y bienestar: *Exercise is Medicine*. Cádiz. España. 14 – 15 de Octubre de 2016.

Libros:

- González-Badillo, J. J., Sánchez-Medina, L., Pareja-Blanco, F., & Rodríguez-Rosell, D. (2017). La velocidad de ejecución como referencia para la programación, control y evaluación del entrenamiento de fuerza (ISBN: 978-84-617-9586-4).

Estancia de Investigación:

- ESTANCIA DE INVESTIGACIÓN de **3 meses** (Septiembre - Diciembre de **2016**) en la **Facultade do Desporto** de la **Universidade da Beira Interior** en Covilhã, Portugal, llevando a cabo tres estudios de investigación en los que se analizó (1) la fiabilidad de la

curva fuerza-velocidad en el ejercicio de press de banca; (2) la respuesta mecánica y metabólica aguda ante diferentes esfuerzos determinados por la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad dentro de cada serie de entrenamiento; y (3) el efecto agudo de la manipulación del tiempo de recuperación entre repeticiones a través de la pérdida de velocidad dentro de la serie y la concentración sanguínea de lactato. Estos trabajos fueron dirigidos por los profesores Dr. **Juan José González Badillo** (UPO) y Dr. **Mario A. Cardoso Marques** (UBI).

En el **ANEXO II** se adjuntan las publicaciones y documentos mencionados.

## RESUMEN

---

### ***La Velocidad de Ejecución como Variable para el Control y la Dosificación del Entrenamiento y como Factor Determinante de las Adaptaciones Producidas por el Entrenamiento de Fuerza***

La presente Tesis está compuesta por tres estudios consecutivos, los cuales fueron realizados en base a los hallazgos de los estudios anteriores, y tuvo como objetivo analizar la importancia de la velocidad de ejecución (1) como variable para prescribir y controlar el entrenamiento de fuerza, y (2) como factor determinante para las adaptaciones neuromusculares. En el primer estudio (**Estudio I**), se analizó (1) el modelo de descenso de la velocidad durante una serie realizada hasta el fallo muscular en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa ante diferentes intensidades relativas; (2) la fiabilidad del porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo número que puede ser completado ante diferentes magnitudes de pérdida de velocidad en la serie; y (3) el grado de fatiga y de recuperación después de una serie realizada hasta el fallo muscular a través de activaciones dinámicas y estáticas. En el segundo estudio (**Estudio II**), se examinó la respuesta mecánica y fisiológica aguda a 16 protocolos de entrenamiento de fuerza realizados con diferente grado de esfuerzo en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca. Por último, en el tercer estudio (**Estudio III**), se comparó el efecto de programas de entrenamiento con diferentes magnitudes de pérdida de velocidad en la serie (10%, 30% y 45% en el ejercicio de sentadilla completa, y 15%, 40% y 55% en el ejercicio de press de banca) y diferentes intensidades relativas (55 - 70% 1RM y 70 - 85% 1RM) sobre las adaptaciones funcionales, neurales y hormonales.

## ESTUDIO I.1

**Título:** Análisis de la pérdida de velocidad durante una serie realizada hasta el fallo muscular ante 8 cargas distintas (50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 y 85% 1RM) en el ejercicio de press de banca.

**Objetivo:** El principal objetivo de este estudio fue analizar la magnitud de pérdida de velocidad alcanzada durante una serie realizada hasta el fallo muscular ante 8 intensidades relativas (50–85 % 1RM) distintas en el ejercicio de press de banca. Un objetivo secundario fue analizar la relación entre el máximo número de repeticiones realizadas ante una intensidad relativa determinada y diferentes variables mecánicas y antropométricas.

**Métodos:** En este estudio participaron 22 hombres sanos, físicamente activos (Media  $\pm$  desviación estándar: Edad:  $24.6 \pm 3.6$  años; Altura:  $1.76 \pm 0.06$  m; Masa corporal:  $75.8 \pm 7.2$  kg). Cada participante realizó 8 sesiones separadas por 5-7 días cada una de ellas. En cada sesión, los participantes llevaron a cabo un test de máximo número de repeticiones posibles (test de MNR), es decir, hasta el fallo muscular, con ocho intensidades relativas diferentes: 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, y 85% 1RM. La carga relativa para cada participante en cada sesión de test fue determinado a partir de la relación fuerza/carga - velocidad en el ejercicio de press de banca.

**Resultados:** Existe una fuerte relación entre la pérdida relativa de velocidad dentro de la serie y el porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo número de repeticiones que pueden ser completadas en la serie con las 8 intensidades relativas utilizadas. Esta relación fue similar para todas las intensidades relativas, pero especialmente para el 50–70 % 1RM, a pesar de que el máximo número de repeticiones realizado con cada intensidad relativa fue significativamente diferente. Se proporcionan las ecuaciones de predicción para estimar el porcentaje de repeticiones realizado cuando se alcanza una determinada magnitud de pérdida de velocidad en una serie con cada una de las intensidades relativas. El número de repeticiones realizado con cada intensidad relativa no mostró relación con ninguna de las variables antropométricas (masa corporal, altura o longitud de los brazos) o mecánicas (velocidad media propulsiva de la primera repetición de la serie, velocidad de la última repetición de la serie, pérdida de velocidad en la serie, fuerza relativa) analizadas en el presente estudio.



**Conclusiones y Aplicaciones Prácticas:** A través del control de la velocidad de cada repetición y el uso de las ecuaciones de predicción proporcionadas, se puede estimar, con considerable precisión, cuantas repeticiones quedan por realizar con cada intensidad durante una serie realizada en el ejercicio de press de banca. Por tanto, los resultados de este estudio sugieren que, en vez de prescribir un número fijo de repeticiones a realizar con una carga determinada, el volumen de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza se debería controlar usando la magnitud de pérdida de velocidad alcanzada dentro de cada serie, ya que ante una misma pérdida de velocidad en la serie el *esfuerzo realizado* (grado de fatiga) por todos los sujetos es muy semejante, aunque el número de repeticiones realizado sea distinto.

## ESTUDIO I.2

**Título:** Estimación de la fatiga a través de acciones estáticas y dinámicas después de una serie realizada hasta el fallo muscular con una carga del 60% de la RM. Fiabilidad del porcentaje de repeticiones realizado ante distintas pérdidas de velocidad en la serie.

**Objetivo:** El presente estudio fue diseñado para 1) analizar la fiabilidad del porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo número de repeticiones que puede ser completado con una carga determinada (60% 1RM) y 2) estimar la fatiga y su recuperación a través de contracciones estáticas y dinámicas, después de una serie realizada hasta el fallo muscular con el 60% 1RM en el ejercicio de press de banca.

**Métodos:** En este estudio participó un grupo de 28 hombres sanos y físicamente activos (Media  $\pm$  desviación típica: Edad:  $23.5 \pm 2.9$  años; Altura:  $1.77 \pm 0.07$  m; Masa corporal:  $75.5 \pm 8.1$  kg). Después de las evaluaciones iniciales, cada participante realizó 2 sesiones separadas por 5-7 días cada una de ellas. En cada sesión, los participantes llevaron a cabo un test de MNR, es decir, hasta el fallo muscular, con el 60% 1RM. Como estimación del grado de fatiga generado por una serie realizada hasta el fallo muscular, y su posterior recuperación, se analizaron distintas variables mecánicas [Velocidad media propulsiva (VMP), Velocidad máxima (PV), Pico de fuerza (PF), Pico de potencia (PP) y producción de fuerza en la unidad de tiempo (RFD)] obtenidas de activaciones dinámicas o estáticas (isométricas) realizadas antes (Pre), inmediatamente después (Post 1) y a los 3 (Post 2), 5 (Post 3), 10 (Post 4), 15 (Post 5), 20 (Post 6) minutos después de terminar la serie hasta el fallo muscular. Durante el primer test de MNR se estimó el grado de fatiga y de recuperación a través de activaciones dinámicas, mientras que en el segundo test de MNR, la fatiga se estimó a través de activaciones estáticas (isométricas).

**Resultados:** No se observaron diferencias significativas en ninguna de las variables mecánicas evaluadas entre el test de MNR 1 y el test de MNR 2. La prueba *t* de Student reveló que no hubo diferencias significativas entre ambos test de MNR en los porcentajes de repeticiones realizados con respecto al máximo posible que se pueden completar para ninguna de las pérdidas de velocidad analizadas. Además, el porcentaje de repeticiones realizado mostró una alta fiabilidad absoluta (CV: 2.1 - 6.6%), con menores valores de CV a medida que incrementaba la pérdida de velocidad alcanzada

en la serie. Los valores alcanzados en cada una de las variables medidas durante los tests dinámicos concéntricos e isométricos muestran un cambio en sentido negativo de todas las variables analizadas entre el Pre y el Post 1, y ninguna de ellas recuperó sus valores iniciales después de 20 min de recuperación, excepto el PF durante las activaciones isométricas. Además, el grado de pérdida y de recuperación del PF y de la RFD fueron similares para las activaciones isométricas y dinámicas en todos los intervalos de tiempo evaluados.

**Conclusiones y Aplicaciones Prácticas:** Dada la fuerte relación entre la pérdida de VMP en la serie con la fatiga y el porcentaje de repeticiones realizado con respecto a las repeticiones posibles en la serie, así como la alta fiabilidad absoluta que muestra el porcentaje de repeticiones realizado para cada magnitud de pérdida de VMP en la serie, se recomienda controlar el volumen de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza a través de la pérdida de VMP en la serie. Además, los resultados de este estudio confirman que, si se pretende evaluar el grado de fatiga que ha producido un determinado tipo de esfuerzo, se debería controlar la pérdida de velocidad o RFD y el tiempo de recuperación de dichas variables, más que la pérdida de fuerza, y preferentemente a través de activaciones dinámicas.

## ESTUDIO I.3

**Título:** Análisis y comparación de la pérdida de velocidad obtenida durante y después de una serie realizada hasta el fallo muscular ante 4 cargas distintas (50, 60, 70 y 80% 1RM) en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.

**Objetivo:** El presente estudio fue diseñado para analizar y comparar: 1) la magnitud de pérdida de velocidad alcanzada durante y después una serie realizada hasta el fallo muscular ante 4 intensidades relativas distintas, y 2) la magnitud de pérdida de velocidad después de cada serie hasta el fallo muscular en función del número de repeticiones realizado en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.

**Métodos:** En este estudio participaron 20 hombres sanos y físicamente activos (Media  $\pm$  desviación típica: edad:  $25.0 \pm 3.5$  años; altura:  $1.77 \pm 0.06$  m; masa corporal:  $76.0 \pm 7.2$  kg). Después de las evaluaciones iniciales, cada participante realizó 8 sesiones separadas por 5-7 días cada una de ellas. En cada sesión, los participantes llevaron a cabo un test de MNR (4 en el ejercicio de press de banca y 4 en el ejercicio de sentadilla completa), es decir, hasta el fallo muscular, con 4 intensidades relativas diferentes: 50, 60, 70 y 80% 1RM. La carga relativa para cada participante en cada sesión de test fue determinada a partir de la relación fuerza/carga - velocidad en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa. Para comparar el grado de fatiga generado por una serie realizada hasta el fallo muscular en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, se analizó la pérdida de velocidad post-esfuerzo ante una carga que se podía desplazar a una velocidad de  $\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $C_{1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}}$ ) antes de realizar el ejercicio.

**Resultados:** Se encontró una fuerte relación entre el porcentaje de pérdida de velocidad en la serie y el porcentaje de repeticiones realizado con las 4 intensidades relativas usadas en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa. La comparación entre ambos ejercicios mostró que, para el mismo porcentaje de pérdida de VMP en la serie, el porcentaje de repeticiones realizado fue mayor en el ejercicio de sentadilla completa que en el de press banca para todas las cargas evaluadas. Para ambos ejercicios, cuanto mayor fue la intensidad relativa con la que se realizó el test de MNR, el porcentaje de pérdida de VMP con la  $C_{1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}}$  fue menor. La comparación entre ambos ejercicios reveló que la pérdida de VMP con la  $C_{1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}}$  fue significativamente mayor para el press de banca que para la sentadilla completa en todas las cargas

analizadas. Además, No se encontraron diferencias significativas en el promedio de pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  para ninguna de las intensidades relativas utilizadas en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.

**Conclusiones y Aplicaciones Prácticas:** Los entrenadores y profesionales del acondicionamiento físico deberían considerar el uso de la magnitud de pérdida de velocidad en cada serie de entrenamiento para controlar el volumen de entrenamiento y el grado de fatiga generado durante el entrenamiento de fuerza de fuerza. Además, las diferencias encontradas en el porcentaje de repeticiones realizado para cada porcentaje de pérdida de VMP analizado entre las distintas intensidades relativas y los diferentes ejercicios usados en el presente estudio, indican que se deberían tener en cuenta también estos factores (intensidad y tipo de ejercicio) cuando se prescribe el volumen de entrenamiento a través de la pérdida de VMP en cada serie.

## ESTUDIO II

**Título:** Efecto agudo producido por distintos tipos de esfuerzo muscular determinados por la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad dentro de cada serie sobre la respuesta mecánica, el estrés hormonal y los cambios en la actividad eléctrica muscular.

**Objetivo:** El presente estudio se diseñó para analizar la respuesta aguda ante 16 protocolos de entrenamiento de fuerza (PEF) determinados por la velocidad de la primera repetición y por la pérdida de velocidad dentro de la serie.

**Métodos:** En este estudio participaron 21 hombres sanos y físicamente activos los cuales fueron divididos en dos grupos: uno que realizó los esfuerzos en el ejercicio de sentadilla completa ( $n = 11$ ) y otro que realizó los esfuerzos en el ejercicio de press de banca ( $n = 10$ ). Durante un periodo aproximado de 10 semanas, cada participante realizó 17 sesiones de evaluación en el siguiente orden: 1) un test isoinercial de cargas progresivas (en sentadilla completa o press de banca, según el grupo asignado) para conocer la relación fuerza/carga - velocidad y la  $1RM_{est}$ , 2) 16 PEF con distintas intensidades y volúmenes. La intensidad relativa se determinó a través de la mayor velocidad (normalmente la primera o segunda repetición) de la primera serie de entrenamiento ( $VMP_{mejor}$ ), mientras que el volumen se cuantificó a través de la pérdida de velocidad dentro de cada serie de entrenamiento. Así, cada PEF para el ejercicio de sentadilla completa se configuró de la siguiente manera (series x  $VMP_{mejor}[\%PV]$ ): 3 x 1.13[10%], 3 x 1.13[20%], 3 x 1.13[30%], 3 x 1.13[45%], 3 x 0.98[10%], 3 x 0.98[20%], 3 x 0.98[30%], 3 x 0.98[45%], 3 x 0.82[10%], 3 x 0.82[20%], 3 x 0.82[30%], 3 x 0.82[45%], 3 x 0.68[10%], 3 x 0.68[20%], 3 x 0.68[30%], 3 x 0.68[45%]; mientras que los PEF en el ejercicio de press de banca fueron configurados como sigue: 3 x 0.93[10%], 3 x 0.93[20%], 3 x 0.93[30%], 3 x 0.93[45%], 3 x 0.79[10%], 3 x 0.79[20%], 3 x 0.79[30%], 3 x 0.79[45%], 3 x 0.63[10%], 3 x 0.63[20%], 3 x 0.63[30%], 3 x 0.63[45%], 3 x 0.47[10%], 3 x 0.47[20%], 3 x 0.47[30%], 3 x 0.47[45%]. Los participantes realizaron los 16 PEF de manera aleatoria. Para analizar la respuesta mecánica, metabólica y neural en cada PEF, los participantes llevaron a cabo una batería de medidas antes e inmediatamente después de cada esfuerzo. Para los PEF realizados en el ejercicio de press de banca sólo se midió la



concentración sanguínea de lactato y la VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$ , mientras que para el ejercicio de sentadilla completa se midió, además de lo anterior, la altura de salto vertical (CMJ), la EMG de superficie durante la realización del test con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$ , y el tiempo en recorrer 10 y 20 m a la máxima velocidad posible. Además, como estimación del grado de esfuerzo producido por cada PEF, se calculó un Índice de Esfuerzo como sigue:  $VMP_{mejor} \times$  el promedio de %PV en la sesión. Los PEF se realizaron en días separados con al menos 72 h de recuperación entre cada uno de ellos.

**Resultados:** Tanto en los PEFs realizados en el ejercicio de sentadilla completa como press de banca, las pérdidas de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  y las concentraciones de lactato post-esfuerzo fueron progresivamente mayores a medida que aumentó el porcentaje de pérdida de velocidad dentro de la serie con cada una de las intensidades utilizadas. Ante la misma pérdida de VMP en la serie, la pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  y la concentración sanguínea de lactato post-esfuerzo fueron mayores cuanto mayor era la VMP de la primera repetición de la primera serie. Los cambios en las variables CMJ y T20 después de cada PEF fueron similares a los obtenidos por la pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$ . Al comparar los cambios en ambas variables entre los ejercicios de sentadilla completa y press de banca se observó que las pérdidas de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  fueron mayores en el ejercicio de press de banca, mientras que la lactatemia post-esfuerzo fue mayor para los PEF realizados en el ejercicio de sentadilla completa. Se encontró una alta relación entre el IE y la pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  en los PEF realizados en el ejercicio de sentadilla completa ( $r = 0.92$ ) y press de banca ( $r = 0.98$ ). Para los PEFs realizados en el ejercicio de sentadilla completa también se encontró una alta relación entre el IE y la pérdida de altura de salto ( $r = 0.93$ ), los cambios en todas las variables analizadas durante el test de carrera en 20 m ( $r = 0.78 - 0.84$ ) y los cambios en la señal de EMG ( $r = 0.54 - 0.80$ ).

**Conclusiones y Aplicaciones Prácticas:** Las altas correlaciones encontradas entre el *índice de esfuerzo* y los cambios en las variables mecánicas, indicadoras de la fatiga, indican que si se quiere generar un determinado grado de esfuerzo, debería programarse el entrenamiento (la *carga*) tomando como referencia la velocidad de la primera repetición en la serie y la pérdida de velocidad dentro de la serie.

## ESTUDIO III.1

**Título:** Comparación de dos magnitudes de pérdida de velocidad en la serie (10% y 30% en sentadilla completa, y 15% y 40% en press de banca) ante las mismas intensidades relativas (70 - 85% 1RM) sobre el rendimiento neuromuscular y los cambios hormonales.

**Objetivo:** El objetivo de este estudio fue comparar el efecto de dos programas de entrenamiento de fuerza que solo diferían en el grado de esfuerzo alcanzado en cada serie, el cual fue cuantificado objetivamente a través de la pérdida de velocidad permitida en cada serie: Un grupo de baja pérdida de velocidad en la serie ( $PV_{baja}$ ; 10% y 15% para los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente) y un grupo de pérdida de velocidad media ( $PV_{media}$ ; 30% y 40% para los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente) sobre las adaptaciones neuromusculares y la concentración hormonal basal.

**Métodos:** En este estudio participaron un total de 26 hombres sanos y físicamente activos, los cuales se distribuyeron de manera aleatoria en los grupos  $PV_{baja}$  ( $n = 12$ ) o  $PV_{media}$  ( $n = 13$ ). El periodo de entrenamiento tuvo una duración de 8 semanas en las cuales se llevaron a cabo 16 sesiones (2 sesiones por semana) de entrenamiento en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca. Los dos grupos experimentales entrenaron con la misma intensidad relativa en cada sesión (70 - 85% 1RM), el mismo número de series (3 series) y el mismo tiempo de recuperación entre series (4 min). La única diferencia entre los dos grupos fue el porcentaje de pérdida de velocidad permitido en cada serie de entrenamiento: 10% vs. 30% para el ejercicio de sentadilla completa y 15% vs. 40% para el ejercicio de press de banca. La velocidad de movimiento de cada repetición se midió y se registró utilizando un transductor lineal de velocidad. Antes y después del periodo de entrenamiento se determinó la fuerza máxima (1RM), el perfil carga-velocidad en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, la altura de salto (CMJ), el T20 y la concentración hormonal basal. Además, se analizó los cambios en la actividad eléctrica muscular en el *vastus lateralis* (VL) y *rectus femoralis* (RF), y *pectoralis major* (PM) y *triceps brachii* (TB).

**Resultados:** Para el ejercicio de sentadilla completa, ambos grupos experimentales mostraron un aumento significativo en todas las variables analizadas, excepto para T20

en el grupo PV<sub>media</sub>. El porcentaje de cambio y el tamaño del efecto intra-grupo fue mayor para el grupo PV<sub>baja</sub> en comparación con el grupo PV<sub>media</sub> en todas las variables medidas durante el ejercicio de sentadilla completa. Además, el grupo PV<sub>baja</sub> mostró un aumento en la actividad neural después del periodo de entrenamiento, mientras que las variables de EMG se mantuvieron sin cambios en el grupo PV<sub>media</sub>. Para el ejercicio de press de banca, ambos grupos experimentales resultaron en mejoras significativas en todas las variables de fuerza y resistencia muscular evaluadas. Sin embargo, a diferencia del ejercicio de sentadilla completa, el grupo PV<sub>media</sub> alcanzó mayores porcentajes de cambio en todas las variables que el grupo PV<sub>baja</sub>. Además, se encontraron aumentos en la amplitud y el espectro de potencia de la EMG en el PM y el TB en ambos grupos. Por otro lado, el grupo PV<sub>baja</sub> mostró menor daño muscular y mejor balance testosterona-cortisol en comparación con el grupo PV<sub>media</sub>.

**Conclusiones y Aplicaciones Prácticas:** Entrenar alcanzando una pérdida de velocidad en la serie baja comparado con una pérdida de velocidad media durante el ejercicio de sentadilla completa produce mayores ganancias sobre la fuerza, la amplitud de EMG y las acciones de alta velocidad como el salto y el sprint, así como un menor estrés hormonal. Sin embargo, para obtener mayores beneficios en el ejercicio de press de banca, parece ser necesario alcanzar un mayor porcentaje de pérdida de velocidad en la serie, el cual puede estar cercano al 40%.

## ESTUDIO III.2

**Título:** Comparación de tres magnitudes de pérdida de velocidad en la serie (10%, 30% y 45% en sentadilla completa, y 15%, 40% y 55% en press de banca) ante las mismas intensidades relativas (55 - 70% 1RM) sobre la fuerza, el rendimiento físico y los cambios neurales y hormonales.

**Objetivo:** El objetivo de este estudio fue comparar el efecto de tres programas de entrenamiento de fuerza que solo diferían en el grado de esfuerzo alcanzado en cada serie, el cual fue cuantificado objetivamente a través de la pérdida de velocidad permitida en cada serie: Un grupo de baja pérdida de velocidad en la serie ( $PV_{baja}$ ; 10% y 15% para los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente), un grupo de pérdida de velocidad media ( $PV_{media}$ ; 30% y 40% para los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente) y un grupo de alta pérdida de velocidad en la serie ( $PV_{alta}$ ; 45% y 55% para los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente) sobre las adaptaciones neuromusculares y la concentración hormonal basal

**Métodos:** En este estudio participaron un total de 34 hombres sanos y físicamente activos, los cuales se distribuyeron de manera aleatoria en los grupos  $PV_{baja}$  ( $n = 11$ ),  $PV_{media}$  ( $n = 11$ ) o  $PV_{alta}$  ( $n = 12$ ). El periodo de entrenamiento tuvo una duración de 8 semanas en las cuales se llevaron a cabo 16 sesiones (2 sesiones por semana) de entrenamiento en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca. Los dos grupos experimentales entrenaron con la misma intensidad relativa en cada sesión (55 - 70% 1RM), el mismo número de series (3 series) y el mismo tiempo de recuperación entre series (4 min). La única diferencia entre los dos grupos fue el porcentaje de pérdida de velocidad permitido en cada serie de entrenamiento: 10%, 30% y 45% para el ejercicio de sentadilla completa, y 15%, 40% y 55% para el ejercicio de press de banca. La velocidad de movimiento de cada repetición se midió y se registró utilizando un transductor lineal de velocidad. Antes y después del periodo de entrenamiento se determinó la fuerza máxima (1RM), el perfil carga-velocidad en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, la altura de salto (CMJ), el T20 y la concentración hormonal basal. Además, se analizó los cambios en la actividad eléctrica muscular en el VL y RF, y PM y TB.

**Resultados:** Para el ejercicio de sentadilla completa, el grupo que entrenó con una menor pérdida de velocidad en la serie ( $PV_{baja}$ ) obtuvo mayores mejoras en el rendimiento en CMJ y T20, y similares e incluso mayores ganancias de fuerza y resistencia muscular, dependiendo de la variable analizada, que los grupos  $PV_{media}$  y  $PV_{alta}$ . Además el grupo  $PV_{media}$  mostró mayores mejoras en el sprint y menores incrementos de salto que  $PV_{alta}$ . Además, el grupo  $PV_{baja}$  mostró un aumento en la actividad neural después del periodo de entrenamiento, mientras que las variables de EMG se mantuvieron sin cambios en los grupos  $PV_{media}$  y  $PV_{alta}$ . Para el ejercicio de press de banca, los tres grupos experimentales mostraron mejoras significativas en todas las variables evaluadas. Sin embargo, el grupo  $PV_{media}$  resultó en mayores porcentajes de cambio en todas las variables en comparación con los otros dos grupos experimentales, mientras que los cambios en el grupo  $PV_{alta}$  fueron ligeramente mayores que en el grupo  $PV_{baja}$ . No se observaron cambios en las variables de EMG para ninguno de los grupos durante el ejercicio de press de banca. Por otro lado, el grupo  $PV_{alta}$  mostró mayor daño muscular y peor balance testosterona-cortisol en comparación con los grupos  $PV_{baja}$  y  $PV_{media}$ .

**Conclusiones y Aplicaciones Prácticas:** Entrenar alcanzando una pérdida de velocidad en la serie baja comparado con una pérdida de velocidad media o alta durante el ejercicio de sentadilla completa produce mayores ganancias sobre la fuerza, la amplitud de EMG y las acciones de alta velocidad como el salto y el sprint, así como un menor daño muscular y menor estado catabólico. Sin embargo, para obtener mayores beneficios en el ejercicio de press de banca, parece ser necesario alcanzar un mayor porcentaje de pérdida de velocidad en la serie, el cual puede estar cercano al 40%.

---

## SUMMARY

---

### ***Movement Velocity as a Critical Variable for Prescribing and Monitoring Resistance Exercise, and as a Determinant Factor of the Resistance Training Induced-Adaptations***

This thesis encompassed three consecutive studies that built upon each other's findings and were aimed at investigating the role played by movement velocity as a variable for prescribing and monitoring resistance exercises, and as a critical variable for determining the adaptations to resistance training (RT). In the first study (**Study I**), we analyzed (1) the pattern of repetition velocity decline during a single set to muscle failure in the bench press (BP) and full squat (SQ) exercises against different submaximal loads; (2) the reliability of the percentage of performed repetitions with respect to the maximum number that can be completed for different magnitudes of velocity loss within a set to failure; and (3) the estimated degree of fatigue and its recovery after a single set to muscle failure through isometric and dynamic activations. In the second study (**Study II**), we examined the acute mechanical and physiological responses to 16 resistance exercises protocols performed with different level of effort in both the SQ and BP exercises. Finally, in the third study (**Study III**), we compared the effects of RT programs with different magnitudes of repetition velocity loss allowed in each set (10%, 30% and 45% in the SQ exercises, and 15%, 40% and 55% in the BP exercise) and different relative intensities (55-70% 1RM and 70-85% 1RM) on functional, neural and hormonal adaptations.

Resistance training is recognized as an effective method for improving athletic performance because it typically results in increases in muscle strength and hypertrophy, power output, speed, and local muscular endurance (Kraemer & Ratamess, 2004; Ratamess et al., 2009). However, one of the main problems faced by coaches, strength and conditioning professionals and researchers is the issue of how to objectively quantify and monitor the actual training load undertaken by athletes in order

to maximize performance (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010). Although several acute variables have been described for the design of RT programs (Bird, Tarpenning, & Marino, 2005; González-Badillo & Ribas, 2002; Kraemer & Ratamess, 2004; Ratamess, et al., 2009), it appears that exercise intensity and volume are the two most critical factors in determining the type and extent of the resulting neuromuscular adaptations (Bird, et al., 2005; Fry, 2004; González-Badillo, Marques, & Sánchez-Medina, 2011; González-Badillo & Ribas, 2002; Tan, 1999).

Exercise intensity during RT has been traditionally identified with relative load (percentage of one-repetition maximum, %1RM) or with the maximal load that can be lifted a given number of repetitions in each set (e. g., 5RM, 10RM, 15 RM) (Fry, 2004; González-Badillo, et al., 2011; González-Badillo & Ribas, 2002; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Tan, 1999). However, these methods appear to have some potential disadvantages (González-Badillo, et al., 2011; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010). As an alternative, recent research has examined the possibility of using movement velocity as an indicator of relative load during resistance exercise (González-Badillo, et al., 2011; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, González-Badillo, Perez, & Pallares, 2014; Sánchez-Medina, Pallarés, Pérez, Morán-Navarro, & González-Badillo, 2017; Sánchez-Moreno, Rodríguez-Rosell, Pareja-Blanco, Mora-Custodio, & González-Badillo, 2017). Close relationships between movement velocity and %1RM have been found for exercises such as the bench press (BP), prone bench pull, squat and pull-up (González-Badillo, et al., 2011; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2017; Sánchez-Moreno, et al., 2017), which makes it possible to determine with considerable precision the %1RM that is being used as soon as the first repetition of a set is performed with maximal voluntary velocity (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010). Such findings open up the possibility of monitoring, in real time, the actual load (%1RM) being used by measuring repetition velocity during RT, thus allowing to determine whether the proposed load (kg) truly represents the %1RM that was intended for each session.

On the other hand, training intensity *per se* is not sufficient to define the training stimulus and should be associated with other *acute training variables*, especially with the training volume (Bird, et al., 2005; Fry, 2004; González-Badillo & Ribas, 2002). The training volume is generally determined from the total number of sets and

repetitions performed during a training session (Bird, et al., 2005; Hass, Feigenbaum, & Franklin, 2001; Kraemer & Ratamess, 2004). Thus, when training volume is prescribed, the vast majority of studies use a specific number of repetitions to complete in each exercise set for all participants. However, the maximal number of repetitions that can be completed against a given relative load has been found to present a large variability between individuals (Douris et al., 2006; Sakamoto & Sinclair, 2006; Shimano et al., 2006; Terzis, Spengos, Manta, Sarris, & Georgiadis, 2008). Therefore, if during a training session all participants perform the same number of repetitions per set against the same relative load (e. g., 70 % 1RM), it is possible that they are exerting a different level of effort (i. e., the number of repetitions left in reserve in each set may vary considerably between individuals). These considerations suggest it is necessary to find better ways to objectively monitor training volume during RT. Accordingly, rather than performing a fixed, predetermined, number of repetitions, it seems more appropriate to stop or terminate each training set as soon as a certain level of neuromuscular fatigue is detected (which, in turn, will depend on the specific goal being pursued) (González-Badillo, et al., 2011; Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, Sánchez-Medina, Sanchis-Moysi, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). During RT in isoinertial conditions, and assuming every repetition is performed with maximal voluntary effort, an unintentional decrease in force, velocity and hence power output is observed as fatigue develops and the number of repetitions approaches failure (Izquierdo, González-Badillo, et al., 2006; Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, Sánchez-Medina, Sanchis-Moysi, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Recent research has shown that monitoring repetition velocity is an objective, practical and non-invasive indicator of the acute metabolic stress, hormonal response and mechanical fatigue induced by RT (González-Badillo et al., 2016; Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, Sánchez-Medina, Ribas-Serna, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Repetition velocity has shown a very similar pattern of decrease during a single set to failure for loads ranging from 60 % to 75 % (Izquierdo, González-Badillo, et al., 2006). However, to our knowledge, the question of how many repetitions remain undone (left in reserve) in an exercise set when a given magnitude of velocity loss is reached (e. g., 20, 30 or 40 % reduction in repetition velocity) has not yet been investigated.



Therefore, in the context of a velocity-based resistance training approach, in the **Study I** of the present Thesis we analyzed (1) the pattern of repetition velocity decline during a single set to muscle failure in the bench press (BP) and full squat (SQ) exercises against different submaximal loads; (2) the reliability of the percentage of performed repetitions with respect to the maximum number that can be completed for different magnitudes of velocity loss within a set to failure; and (3) the estimated degree of fatigue and its recovery after a single set to muscle failure through isometric and dynamic activations. To this end, three separate partial studies were undertaken: **Study I.1**, **Study I.2** and **Study I.3**.

Knowledge of the mechanical and physiological aspects underlying RT is essential to improve our understanding of the stimuli affecting the neuromuscular adaptations (Crewther, Cronin, & Keogh, 2005; Crewther, Keogh, Cronin, & Cook, 2006; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). The combination of the different acute resistance training variables result in very different training protocols and, consequently, different stimuli for neuromuscular adaptations (Kraemer & Ratamess, 2004; Spiering, et al., 2008; Toigo & Boutellier, 2006). Therefore, it seems important to carry out investigations that allow us to know how to modulate the neuromuscular, metabolic and endocrine response modifying the main variables that define the training load (volume and intensity)

Different studies have analyzed the mechanical and physiology response after: (1) different resistance training protocols to muscle failures using different load magnitudes (e. g., 10RM vs. 5RM) (Kraemer, Dziados, et al., 1993; Kraemer, Fleck, et al., 1993; Kraemer et al., 1990; Leite et al., 2011; Smilios, Pilianidis, Karamouzis, & Tokmakidis, 2003), (2) resistance exercise protocols performing maximum (to failure) vs. half-maximum number of repetitions per set against the same load (e.g., 5 of 10 possible repetitions with a given load compared with performing all repetitions (10RM) (González-Badillo, et al., 2016; Gorostiaga, Navarro-Amezqueta, Calbet, et al., 2012; Gorostiaga et al., 2014; Gorostiaga, Navarro-Amezqueta, González-Izal, et al., 2012; Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, Sánchez-Medina, Ribas-Serna, et al., 2016); and (3) resistance training protocols performing maximum and forced repetition (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Ahtiainen, Pakarinen, Kraemer, & Hakkinen, 2003, 2004; Gentil et al.,

2006). In addition, a recent study (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) analyzed the acute mechanical and metabolic response to 15 resistance exercise protocols differing in the number of repetitions performed in each set with respect to the maximum predicted number against a given load. The results of this study (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) allowed us to know the validity and practical relevance of the concept *level of effort* (relationship between the degree of requirement demanded by performing a determined physical effort and the actual possibilities of a subject at a given moment, i.e., the relationship between what was done and what could be done) as a variable for monitoring and dosing the resistance training. However, as a result of studies published in relation to the use of movement velocity for monitoring resistance exercise (González-Badillo, et al., 2014; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Izquierdo, et al., 2006; Pareja-Blanco, et al., 2014; Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, Sánchez-Medina, Sanchis-Moysi, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), rather than a determined, fixe, load (kg) and number of repetitions, the *level of effort* during resistance training should be prescribed using two variables: (1) first repetition's mean velocity, which is intrinsically related to loading intensity (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010), and (2) the magnitude of velocity loss attained in each exercise set because it is closely linked to the actual level of effort being incurred (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Therefore, the acute mechanical, metabolic and neural response to 16 resistance training protocols defined by the best mean propulsive velocity (MPV) (usually the first repetitions) over the set and the percentage of MPV loss (%VL) within the set in both SQ and BP exercises were analyzed in **Study II** of this Thesis.

Although several studies (Ahtiainen, Pakarinen, Alen, Kraemer, & Hakkinen, 2003; Bird, et al., 2005; Drinkwater et al., 2005; Kraemer & Ratamess, 2004; Rooney, Herbert, & Balnave, 1994; Willardson, 2007; Willardson, Norton, & Wilson, 2010) have suggested that performing repetitions to failure may be necessary to maximize muscle strength and hypertrophy, other studies seem to indicate that similar, and even greater, strength gains and improvements in athletic performance can be obtained without reaching muscle failure (Folland, Irish, Roberts, Tarr, & Jones, 2002; Izquierdo-Gabarren et al., 2010; Izquierdo, Ibanez, et al., 2006; Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, Sánchez-Medina, Sanchis-Moysi, et al., 2016; Pareja-Blanco,

Sánchez-Medina, Suarez-Arrones, & González-Badillo, 2016; Sampson & Groeller, 2016). The rationale for performing resistance exercises to failure is to maximize motor unit recruitment (Davies, Orr, Halaki, & Hackett, 2016; Willardson, 2007), although it has also been hypothesized that failure compared with non-failure training could lead to greater elevation of anabolic hormone levels (Davies, et al., 2016; Drinkwater, et al., 2005; Schoenfeld, 2010), which may contribute to resistance training-induced changes in muscular strength (Ahtiainen, et al., 2003; Davies, et al., 2016; Ronnestad, Nygaard, & Raastad, 2011). However, recent evidence have shown that motor unit recruitment can be maximized without the need to perform resistance exercise to failure (Desmedt & Godaux, 1977; Gorostiaga et al., 2012; Sundstrup et al., 2012), and elevation of anabolic hormone levels is not required for significant increases in muscular strength (West et al., 2010; West et al., 2009; Wilkinson, Tarnopolsky, Grant, Correia, & Phillips, 2006). Therefore, the controversial results found in the literature clearly emphasize the need to conduct further research on this topic.

As mentioned above, movement velocity is a critical variable for accurately estimate training intensity and volume during resistance training. Thus, movement velocity should be used as a reference variable for monitoring and dosing the resistance exercise. In relation to this novel velocity-based resistance training approach, a recent study (Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, Sánchez-Medina, Sanchis-Moysi, et al., 2016) compared the effects of two RT programs in SQ exercise only differing in the level of effort quantify by repetition velocity loss allowed in each set: 20% (VL20%) vs. 40% (VL40%) on muscle structural and functional adaptations. Relative magnitude of training loads (Determined through the first repetition's mean velocity), number of sets (three), and inter-set recoveries (4 min) were kept identical for both groups in each training session. The results of this study (Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, Sánchez-Medina, Sanchis-Moysi, et al., 2016) showed that VL40% resulted in greater muscle hypertrophy and reduction of myosin heavy chain IIX percentage than VL20%. Although VL20% resulted in lower hypertrophic response, this group resulted in similar squat strength gains than VL40% and greater improvements in CMJ and sprint performance. Thus, it seems that performing resistance training only using SQ exercise at 70-85% 1RM and low degree of fatigue (20% velocity loss) in each training set induce greater improvements on neuromuscular performance than performing the same training program with maximum or near maximum degree of fatigue (40% velocity

loss) in each training set. However, considering that, against load magnitudes of 70-85% 1RM in SQ exercises, (1) a 20% velocity loss involves performing approximately 50% of maximum possible repetitions, and (2) a 40% velocity loss means performing approximately 70-80% of maximum possible repetitions, there exists a wide range of percentage of performed repetitions remains unanalyzed. Thus, based on studies published to date, we can not assert that velocity losses in the series above 20% tend to produce lower gains on strength and athletic performance. In addition, the *level of effort* depends on velocity loss in the set (volume), but also of the first repetition's mean velocity (relative intensity), and that such *level of effort* is different depending on the exercise used (SQ or BP exercise) (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Therefore, the **Study III** was aimed to analyze the effects of different MPV losses in the set and load magnitudes in SQ and BP exercises on the changes in neuromuscular performance and resting hormonal concentration. To this end, two separate partial studies were undertaken: **Study III.1** and **Study III.2**.

## STUDY I.1

**Title:** Analysis of movement velocity decline during a single set to muscle failure against 8 submaximal load magnitudes (50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 and 85% 1RM) in the BP exercise.

**Purpose:** The main aim of this study was to analyze the pattern of repetition velocity decline during a single set to failure against different submaximal loads (50 - 85 % 1RM) in the bench press exercise. A secondary aim was to analyze the relationship between the maximal number of completed repetitions against a given load magnitude and different mechanical and anthropometric variables.

**Methods:** A group of 22 young healthy men (mean  $\pm$  SD: age  $24.6 \pm 3.6$  years; height  $1.76 \pm 0.06$  m; body mass  $75.8 \pm 7.2$  kg) volunteered to participate in this study. Participants performed 8 testing sessions in random order, every 6 - 7 days. During each session, participants performed a test of maximum number of repetitions to failure (MNR test) against the corresponding load: 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80, and 85% 1RM. Relative loads were determined from the load-velocity relationship for the BP.

**Results:** A very close relationship was found between the relative loss of velocity in a set and the percentage of performed repetitions for all 8 relative load used. This relationship was very similar for all loads, but particularly for 50 - 70 % 1RM, even though the maximal number of repetitions completed at each load was significantly different. Equations to predict the percentage of performed repetitions from relative velocity loss are provided. The number of repetitions performed against each load showed no relationship to either anthropometric (body mass, height, arm length) or mechanical variables (MPV of the fastest repetition in the set, MPV of the last repetition in the set, loss of MPV over the set, estimated 1RM and relative strength ratio).

**Conclusions and practical applications:** By monitoring repetition velocity and using these equations provided, one can estimate, with considerable precision, how many repetitions are left in reserve in a bench press exercise set. Therefore, our results highlight the practical importance of using the loss of repetition velocity for monitoring the *level of effort* and the training volume during resistance exercise.

## STUDY I.2

**Title:** Estimation of neuromuscular fatigue during isometric and dynamic activations after a single set to muscle failure at 60% 1RM. Reliability of percentage of repetitions performed against different velocity losses in the set.

**Purpose:** This study aimed: (1) to analyze the reliability of the percentages of performed repetitions with respect to the maximum possible number that can be completed in a set to failure at 60% 1RM when a given magnitude of MPV loss (15 - 75 %) is reached; and (2) to compare the degree of estimated fatigue and its recovery during isometric and dynamic activations after a single set to muscle failure at 60% 1RM in the BP exercise.

**Methods:** Twenty-eight young healthy men (mean  $\pm$  SD: age  $23.5 \pm 2.9$  years; height  $1.77 \pm 0.07$  m; body mass  $75.5 \pm 8.1$  kg) volunteered to participate in this study. After initial evaluations, participants performed two testing sessions separated by 5 - 7 days. During each session, participants carried out a single set to muscle failure (MNR test) at 60% 1RM in the BP exercise. As estimation of the degree of fatigue induced during the set to failure, and its later recovery, it was analyzed the change in different mechanical variables [MPV, peak velocity (PV), peak force (PF), peak power (PP) and rate of force development (RFD)] measured during isometric and dynamic activations immediately after the effort (Post 1) and at 3 (Post 2), 5 (Post 3), 10 (Post 4), 15 (Post 5), 20 (Post 6) min post-effort. During the first testing session, fatigue was estimated by dynamic activations, whereas in the second testing session fatigue was estimated by isometric activations.

**Results:** No significant differences were found for any mechanical variable between the MNR test 1 and 2. Paired t-tests revealed no significant differences between trials for any percentage of repetitions completed at each magnitude of MPV loss. The percentages of repetitions completed had very high absolute reliability (CV: 2.1 - 6.6 %), with lower CV values as the loss of MPV over the set increased. All kinetic and kinematic variables assessed during dynamic and isometric activations showed a significant decrease immediately after the MNR test, and none of them recovered the initial values following 20 min rest time, except the PF during isometric activations. In

additions, the degree of loss and recovery of PF and RFD variables was similar for isometric and dynamic activations in all time intervals assessed.

**Conclusions and practical applications:** Considering the strong correlation between the percentage of MPV loss and the percentages of performed repetitions with respect to the maximum possible number that can be completed as well as the high absolute reliability of the percentage of performed repetitions when a given magnitude of MPV loss is reached, it is recommended to use the loss of repetition velocity for monitoring the training volume during resistance exercise. In addition, the degree of fatigue and recovery following resistance exercises should be assessed by dynamic activations and preferably using movement velocity (MPV and PV) and RFD variables.

## STUDY I.3

**Title:** Analysis and comparison of movement velocity decline during and after a single set to muscle failure against 4 submaximal load magnitudes (50, 60, 70 and 80% 1RM) in the BP and SQ exercises.

**Purpose:** The present study was designed to analyze and compare: (1) the magnitude of velocity loss during and after a single set to muscle failure against 4 different relative intensities; and (2) the percentage of velocity loss after each set to muscle failure depending on the maximal number of repetitions completed in both the BP and SQ exercises.

**Methods:** Twenty young healthy men (mean  $\pm$  SD: age  $25.0 \pm 3.5$  years; height  $1.77 \pm 0.06$  m; body mass  $76.0 \pm 7.2$  kg) volunteered to participate in this study. Participants performed 8 testing sessions in random order, every 6–7 days. During each session, participants performed a MNR test (4 in the BP exercise and 4 in the SQ exercise) against 4 submaximal load magnitudes: 50, 60, 70 and 80% 1RM. Relative loads were determined from the load-velocity relationship for the each exercise. The degree of fatigue after each MNR test was estimated by percentage of velocity loss attained with the individual load that elicited a  $\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $L1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) before the effort.

**Results:** A very close relationship was found between the relative loss of velocity in a set and the percentage of performed repetitions for all 4 relative loads used in the BP and SQ exercises. Comparisons between both exercises showed that for the same percentage of MPV loss over the set, the percentage of performed repetitions with respect to the maximum possible number that can be completed was greater in the SQ than BP exercise for all four loads used. The percentage of loss of MPV with the  $L1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  load was significantly greater for the BP than the SQ exercise in all four loads used. No significant differences in the average loss of MPV with  $L1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  were found between groups for any of load magnitudes used in the BP or SQ exercise.

**Conclusions and practical applications:** Coaches and strength and conditioning professionals should consider using the magnitude of velocity loss attained in each exercise set for monitoring training volume during RT. In addition, our results have also shown that there are some differences in term of percentage of repetitions completed



depending on percentage of velocity loss over the set distinctive of each exercise and load magnitude used that should be taken into account when prescribing training volume through velocity loss.

## STUDY II

**Title:** Acute effect of different resistance training protocols determined by the first repetition's mean velocity and maximum percent velocity loss to be allowed in each set on mechanical, metabolic and neuromuscular response.

**Purpose:** This study aimed to analyze the acute mechanical, metabolic and neural response to resistance exercise protocols (REP) differing in the first repetition's mean velocity ( $MPV_{best}$ ) and percentage of velocity loss in the set (VL).

**Methods:** Twenty-one young healthy men (11 in the SQ exercise [mean  $\pm$  SD: age  $23.5 \pm 2.9$  years; height  $1.77 \pm 0.07$  m; body mass  $75.5 \pm 8.1$  kg] and 10 in the BP exercise [mean  $\pm$  SD: age  $23.5 \pm 2.9$  years; height  $1.77 \pm 0.07$  m; body mass  $75.5 \pm 8.1$  kg]) volunteered to participate in this study. During a period of approximately 10 weeks, each participant performed 17 testing sessions in the following order: 1) an initial test with increasing loads for the individual determination of 1RM strength and full load-velocity relationship in the SQ or BP exercise, 2) 16 REP determined by the best MPV (usually the first repetitions) over the set ( $MPV_{best}$ ) and the percentage of MPV loss (%VL) within the set (S). Thus, REP in the SQ exercise were configured as follows (S x  $MPV_{BEST}$  [%VL]): 3 x 1.13[10%], 3 x 1.13[20%], 3 x 1.13[30%], 3 x 1.13[45%], 3 x 0.98[10%], 3 x 0.98[20%], 3 x 0.98[30%], 3 x 0.98[45%], 3 x 0.82[10%], 3 x 0.82[20%], 3 x 0.82[30%], 3 x 0.82[45%], 3 x 0.68[10%], 3 x 0.68[20%], 3 x 0.68[30%], 3 x 0.68[45%], whereas REP in the BP exercise were configured as follows: 3 x 0.93[10%], 3 x 0.93[20%], 3 x 0.93[30%], 3 x 0.93[45%], 3 x 0.79[10%], 3 x 0.79[20%], 3 x 0.79[30%], 3 x 0.79[45%], 3 x 0.63[10%], 3 x 0.63[20%], 3 x 0.63[30%], 3 x 0.63[45%], 3 x 0.47[10%], 3 x 0.47[20%], 3 x 0.47[30%], 3 x 0.47[45%]. These 16 REP sessions were randomized for each participant. In order to analyze the acute mechanical, metabolic and neural response to each REP, participants undertaken a battery of measurements at before and immediately after each effort: blood lactate concentration, and the individual load that elicited a  $\sim 1.00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $\pm 0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) MPV ( $L1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), and vertical countermovement jump (CMJ) height, surface EMG signals and sprint time in 20 m (T20) (only in SQ group). In addition, as an estimation of the level of effort induced by each REP, it was calculated an *Effort Index* as follow:  $MPV_{best}$

x average %VL in the training session. All testing sessions were conducted on separate days, with at least 72 h of recovery time.

**Results:** In both exercises, the MPV loss with  $L1m \cdot s^{-1}$  and post-effort blood lactate concentration were progressively greater as the percentage of MPV over the set increased at each relative intensity used. For the same percentage of MPV loss over the set, the MPV loss against  $L1m \cdot s^{-1}$  and post-effort blood lactate concentration were progressively greater as the relative intensity decreased. The changes for CMJ and T20 after the different REP were similar to those shown by the MPV loss with  $L1m \cdot s^{-1}$ . The MPV loss against  $L1m \cdot s^{-1}$  was significantly greater for BP compared with SQ and strongly correlated to peak post-exercise lactate ( $r = 0.95 - 0.96$ ) for both the SQ and BP. The *Effort Index* showed a strong relationship with (1) the MPV loss with  $L1m \cdot s^{-1}$  ( $r = 0.92 - 0.98$ ), (2) peak post-exercise lactate concentration ( $r = 0.91 - 0.95$ ), (3) CMJ height loss ( $r = 0.93$ ), (4) changes in T20 ( $r = 0.77$ ), and (5) EMG signal ( $r = 0.54 - 0.80$ ).

**Conclusions and practical applications:** The high correlations found between the *Effort Index* and mechanical (velocity against  $L1m \cdot s^{-1}$ , CMJ height and T20 losses), metabolic (lactate) and neural measures of fatigue support the validity of using the *Effort Index* to objectively estimate neuromuscular fatigue during resistance training.

## STUDY III.1

**Title:** Comparison of two percentages of MPV loss in the set (10% and 30% in the SQ exercise, and 15% and 40% in the BP exercise) against the same relative intensities (70 - 85% 1RM) on neuromuscular performance and chronic hormonal changes.

**Purpose:** This study aimed to compare the effects of two RT programs only differing in the level of effort achieved in each set, objectively quantified by repetition velocity loss allowed in each set: low-velocity loss group ( $VL_{low}$ ; 10% and 15% for SQ and BP exercise, respectively) and medium-velocity loss group ( $VL_{medium}$ ; 30% and 40% for SQ and BP exercise, respectively) on neuromuscular adaptations and resting hormonal concentration.

**Methods:** Twenty-five young males were randomly assigned to a  $VL_{low}$  ( $n = 12$ ) or  $VL_{medium}$  ( $n = 13$ ) training group. Participants followed an 8-week velocity-based RT program using the SQ and BP exercises with relative loads of 70-85% 1RM and executing every repetition at maximal intended velocity. Movement velocity in all repetitions was registered by a linear velocity transducer. The 1RM strength, full load-velocity profile in SQ and BP exercise, CMJ height, T20 and resting hormonal concentration were determined pre- and post-training. In addition, EMG signal of *vastus lateralis* (VL) and *rectus femoralis* (RF), and *pectoralis major* (PM) and *triceps brachii* (TB) was recorded during the isoinertial loading test in SQ and BP exercises, respectively.

**Results:** For the SQ exercise, both experimental groups showed significant improvements in all variables analyzed, except in T20 for  $VL_{medium}$ . The percentage of change and intra-group effect size was greater for  $VL_{low}$  compared to  $VL_{medium}$  in all variables assessed during SQ exercise. In addition,  $VL_{low}$  showed an increment in the neural activity after resistance training period, whereas EMG variables in  $VL_{medium}$  remain unchanged. For the BP exercise, both experimental groups also showed significant improvements in all strength and muscle endurance variables. However, unlike the SQ exercise, the  $VL_{medium}$  resulted in greater percentage of change in all variables assessed than  $VL_{low}$ . Moreover, increments in EMG amplitude and power frequency of PM and TB were found in both training groups. On the other hand,

VL<sub>medium</sub> showed greater muscle damage and worse testosterone-cortisol balance than VL<sub>low</sub>.

**Conclusions and practical applications:** Training with a low compared to medium percentage of MPV loss in the set during SQ exercise produces greater gains in muscle strength, EMG activity and high-speed actions such as jump and sprint, as well as lower hormonal stress. However, in order to obtain greater beneficial effects in BP exercise, training sessions should be conducted allowing a greater percentage of velocity loss in the set.

## STUDY III.2

**Title:** Comparison of three percentages of MPV loss in the set (10, 30, and 45% in the SQ exercise, and 15, 40 and 55% in the BP exercise) against the same relative intensities (55 - 70% 1RM) on neuromuscular performance and chronic hormonal changes.

**Purpose:** This study aimed to compare the effects of three RT programs only differing in the level of effort achieved in each set, objectively quantified by repetition velocity loss allowed in each set: low-velocity loss group ( $VL_{low}$ ; 10% and 15% for SQ and BP exercise, respectively), medium-velocity loss group ( $VL_{medium}$ ; 30% and 40% for SQ and BP exercise, respectively) and high-velocity loss group ( $VL_{high}$ ; 45% and 55% for SQ and BP exercise, respectively) on neuromuscular adaptations and resting hormonal concentration.

**Methods:** Thirty-four young males were randomly assigned to a  $VL_{low}$  ( $n = 11$ ),  $VL_{medium}$  ( $n = 11$ ) or  $VL_{high}$  ( $n = 13$ ) training group. Participants followed an 8-week velocity-based RT program using the SQ and BP exercises with relative loads of 55 - 70% 1RM and executing every repetition at maximal intended velocity. Movement velocity in all repetitions was registered by a linear velocity transducer. The 1RM strength, full load-velocity profile in SQ and BP exercise, CMJ height, T20 and resting hormonal concentration were determined pre- and post-training. In addition, EMG signal of VL and RF, and PM and TB was recorded during the isoinertial loading test in SQ and BP exercises, respectively.

**Results:** For the SQ exercise, the training group reaching the lower velocity loss in the set ( $VL_{low}$ ) obtained greater improvements in jump and sprint performance, and similar or even greater gains in strength and muscle endurance, depending on the variable analyzed, than the  $VL_{medium}$  and  $VL_{high}$ . In addition, the  $VL_{medium}$  showed greater sprint improvements and lower increments in jump performance than  $VL_{high}$ . The improvements in  $VL_{low}$  were accompanied by an increment in electrical muscle activity (EMG) for RF and VL muscles, whereas EMG variables in  $VL_{medium}$  and  $VL_{high}$  remain unchanged. For the BP exercise, all three experimental groups showed significant improvements in all strength and muscle endurance variables. However, the  $VL_{medium}$  resulted in greater percentage of change in all variables assessed than  $VL_{low}$  and  $VL_{high}$ ,

whereas the changes in  $VL_{high}$  were slightly greater than in  $VL_{low}$ . No changes were observed in EMG variables for any muscle assessed during the BP exercise. On the other hand,  $VL_{high}$  showed greater muscle damage and worse testosterone-cortisol balance than  $VL_{low}$  and  $VL_{medium}$ .

**Conclusions and practical applications:** Resistance training involving low compared to medium or high percentage of MPV loss in the set during SQ exercise produces greater gains in muscle strength, EMG activity and high-speed actions such as jump and sprint, as well as lower muscle damage and catabolic status. However, in order to obtain greater beneficial effects in BP exercise, training sessions should be conducted allowing a greater percentage of velocity loss in the set.





# Índice

<b>1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>2. Origen de la Problemática Objeto de Estudio .....</b>	<b>9</b>
<b>3. Estado Actual del Conocimiento .....</b>	<b>23</b>
<b>3.1. Componentes que definen la carga de entrenamiento de fuerza .....</b>	<b>23</b>
3.1.1. Intensidad .....	23
3.1.2. Volumen.....	26
3.1.3. Tiempo de recuperación entre series y entre repeticiones.....	29
3.1.4. Tipo de ejercicio.....	31
3.1.5. Orden de los ejercicios .....	33
3.1.6. Velocidad de ejecución .....	34
<b>3.2. Fatiga neuromuscular.....</b>	<b>37</b>
3.2.1. Definición .....	37
3.2.2. Factores asociados con la fatiga muscular .....	38
Cambios metabólicos en la musculatura con la fatiga .....	39
Cambios neurales con la fatiga .....	42
3.2.3. Formas de medir la fatiga muscular.....	43
3.2.4. La fatiga como elemento necesario para la adaptación .....	46
<b>3.3. Respuesta mecánica y fisiológica aguda ante sesiones de entrenamiento de fuerza realizadas con la misma intensidad relativa pero con diferentes volúmenes .....</b>	<b>49</b>
<b>3.4. Relación entre el volumen de entrenamiento y la mejora del rendimiento.....</b>	<b>56</b>
<b>3.5. Justificación del uso de entrenamientos hasta el fallo muscular .....</b>	<b>58</b>
<b>3.6. Efectos del entrenamiento de fuerza con distintos volúmenes.....</b>	<b>60</b>
3.6.1. Efectos del entrenamiento hasta el fallo vs. no fallo .....	61
3.6.2. Efectos del entrenamiento de fuerza basado en la velocidad .....	64
<b>4. Estudio I: La pérdida de velocidad como variable para controlar el volumen y estimar la fatiga durante el entrenamiento de fuerza .....</b>	<b>71</b>
<b>4.1. Planteamiento del Problema y Propósito de la Investigación.....</b>	<b>71</b>

<b>4.2. Objetivos de la Investigación.....</b>	<b>73</b>
<b>4.3. Hipótesis.....</b>	<b>75</b>
<b>4.4. Estudio I.1: Análisis de la pérdida de velocidad durante una serie realizada hasta el fallo muscular ante 8 cargas distintas (50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 y 85% 1RM) en el ejercicio de press de banca .....</b>	<b>81</b>
4.4.1. Metodología .....	81
4.4.2. Resultados.....	93
4.4.3. Discusión .....	99
4.4.4. Conclusiones .....	103
4.4.5. Aplicaciones Prácticas .....	105
<b>4.5. Estudio I.2: Estimación de la fatiga a través de acciones estáticas y dinámicas después de una serie realizada hasta el fallo muscular con una carga del 60% de la RM. Fiabilidad del porcentaje de repeticiones realizado ante distintas pérdidas de velocidad en la serie .....</b>	<b>109</b>
4.5.1. Metodología .....	109
4.5.2. Resultados.....	123
4.5.3. Discusión .....	131
4.5.4. Conclusiones .....	143
4.5.5. Aplicaciones Prácticas .....	145
<b>4.6. Estudio I.3: Análisis y comparación de la pérdida de velocidad obtenida durante y después de una serie realizada hasta el fallo muscular ante 4 cargas distintas (50, 60, 70 y 80% 1RM) en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa .....</b>	<b>149</b>
4.6.1. Metodología .....	149
4.6.2. Resultados.....	157
4.6.3. Discusión .....	165
4.6.4. Conclusiones .....	173
4.6.5. Aplicaciones Prácticas .....	175
<b>5. Estudio II: Efecto agudo producido por distintos tipos de esfuerzo muscular determinados por la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad dentro de cada serie sobre la respuesta mecánica, el estrés hormonal y los cambios en la actividad eléctrica muscular .....</b>	<b>179</b>

<b>5.1. Planteamiento del Problema y Propósito de la Investigación.....</b>	<b>179</b>
<b>5.2. Objetivos de la Investigación.....</b>	<b>183</b>
<b>5.3. Hipótesis.....</b>	<b>185</b>
<b>5.4. Metodología.....</b>	<b>189</b>
<b>5.2. Resultados.....</b>	<b>217</b>
<b>5.6. Discusión.....</b>	<b>235</b>
<b>5.7. Conclusiones .....</b>	<b>251</b>
<b>5.8. Aplicaciones Prácticas .....</b>	<b>253</b>
<b>6. Estudio III: Efecto de la pérdida de velocidad en la serie durante el entrenamiento de fuerza con distintas intensidades sobre la fuerza aplicada, el rendimiento físico, la respuesta hormonal y los cambios neurales .....</b>	<b>257</b>
<b>6.1. Planteamiento del Problema y Propósito de la Investigación.....</b>	<b>257</b>
<b>6.2. Objetivos de la Investigación.....</b>	<b>261</b>
<b>6.3. Hipótesis.....</b>	<b>263</b>
<b>6.4. Estudio III.1: Comparación de dos magnitudes de pérdida de velocidad en la serie (10% y 30% en sentadilla completa, y 15% y 40% en press de banca) ante las mismas intensidades relativas (70 - 85% 1RM) sobre el rendimiento neuromuscular y los cambios hormonales .....</b>	<b>275</b>
6.4.1. Metodología .....	275
6.4.2. Resultados.....	297
6.4.3. Discusión .....	311
6.4.4. Conclusiones .....	331
6.4.5. Aplicaciones Prácticas .....	333
<b>6.5. Estudio III.2: Comparación de tres magnitudes de pérdida de velocidad en la serie (10%, 30% y 45% en sentadilla completa, y 15%, 40% y 55% en press de banca) ante las mismas intensidades relativas (55 - 70% 1RM) sobre la fuerza, el rendimiento físico y los cambios neurales y hormonales .....</b>	<b>337</b>
6.5.1. Metodología .....	337
6.5.2. Resultados.....	357
6.5.3. Discusión .....	377
6.5.4. Conclusiones .....	399
6.5.5. Aplicaciones Prácticas .....	401

<b>7. Conclusiones Generales / General Conclusions .....</b>	<b>405</b>
<b>8. Aplicaciones Prácticas Generales / General Practical Applications .....</b>	<b>421</b>
<b>9. Limitaciones de la Investigación .....</b>	<b>431</b>
<b>10. Futuras Líneas de Investigación .....</b>	<b>435</b>
<b>11. Referencias Bibliográficas .....</b>	<b>439</b>
<b>Relación de Tablas .....</b>	<b>487</b>
<b>Relación de Figuras .....</b>	<b>493</b>
<b>Glosario de Acrónimos .....</b>	<b>501</b>
<b>ANEXO I. Consentimiento Informado .....</b>	<b>507</b>
<b>ANEXO II. Publicaciones y Divulgación de los Resultados .....</b>	<b>513</b>

# 1. Introducción





## 1. Introducción

Cualquier acción, independientemente del ámbito en el que se realice o la finalidad de la misma, requiere una aplicación de fuerza determinada por parte de la musculatura implicada en el movimiento (Toigo & Boutellier, 2006), la cual va a depender de diferentes factores tales como la velocidad de ejecución, la duración o la resistencia a vencer. Desde este punto de vista, podríamos decir que todo lo que hacemos en nuestra vida cuando tratamos de movernos o desplazar objetos es aplicar fuerza. Debido a esto, la fuerza muscular es reconocida en la actualidad como una cualidad física fundamental para el rendimiento deportivo, así como para el mantenimiento de la salud y la mejora de la calidad de vida de las personas (Bird, Tarpenning, & Marino, 2005; Hass, Feigenbaum, & Franklin, 2001). De hecho, la fuerza representa la cualidad básica y principal sobre la cual se sustentan el resto de capacidades condicionales descritas como la *velocidad* (capacidad de aplicar cada vez una mayor cantidad de fuerza en menos tiempo) o la *resistencia* (capacidad de mantener una misma aplicación de fuerza durante más tiempo o aplicar una mayor cantidad de fuerza durante el tiempo o distancia que dura la prueba). Por este motivo, la fuerza muscular es importante en todas las disciplinas deportivas y un factor determinante del rendimiento. No es de extrañar, por tanto, que el entrenamiento de la fuerza muscular sea hoy día uno de los pilares básicos de cualquier programa de entrenamiento dirigido tanto a la mejora del rendimiento deportivo (Granacher et al., 2016; Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, Sánchez-Medina, Gorostiaga, & González-Badillo, 2014; Pareja-Blanco et al., 2016; Rodríguez-Rosell et al., 2016; Torres-Torrelo, Rodríguez-Rosell, & González-Badillo, 2016) como al desarrollo de una condición física saludable y la readaptación/rehabilitación de lesiones (Joseph & Denegar, 2015) o como parte del tratamiento de enfermedades neuromusculares degenerativas (Cruickshank, Reyes, & Ziman, 2015; Saltychev, Barlund, Paltamaa, Katajapuu, & Laimi, 2016), endocrinas (Rohling, Herder, Roden, Stemper, & Mussig, 2016) o inmunológicas (Braam et al., 2016; Denham, Marques, Bruns, O'Brien, & Charchar, 2016).

Desde que empezaran a publicarse los primeros estudios en los que se ponían de manifiesto los efectos beneficiosos de realizar "*ejercicios con altas cargas (heavy-resistance exercise)*" y "*esfuerzos musculares repetidos (repeated muscular exertion)*" para la mejora de la fuerza y la potencia muscular tanto en niños como en adultos

(Darcus & Salter, 1955; Delorme, 1945; Houtz, Parrish, & Hellebrandt, 1946; Rarick & Larsen, 1959), el número de publicaciones ha ido creciendo progresivamente cada año, principalmente en la última década. Este aumento en el número de artículos científicos relacionados con el análisis y la comparación de los diferentes factores que engloban el entrenamiento de fuerza pone de relevancia dos cuestiones fundamentales: 1) la importancia de la fuerza muscular para la mejora y el desarrollo de la condición física, independientemente del ámbito en el que se aplique (rendimiento deportivo, preventivo o terapéutico); y 2) que a pesar de los numerosos avances en nuestro entendimiento sobre las distintas manifestaciones de la fuerza y el desarrollo de distintos medios y métodos de entrenamiento encaminados a la mejora de la fuerza y la potencia muscular, así como la mejor comprensión del sistema neuromuscular humano y la influencia de los factores genéticos relacionados con el desarrollo muscular, el hecho de que cada año aparezca un mayor número de publicaciones relacionadas con el entrenamiento de fuerza pone de manifiesto que aún existen importantes lagunas en este ámbito del conocimiento.

Aspectos relacionados con elementos básicos del entrenamiento como la cuantificación, dosificación y control de la carga de entrenamiento, y otros más complejos como la fatiga neuromuscular, la respuesta fisiológica del organismo ante diferentes estímulos de entrenamiento y la influencia de los aspectos mecánicos, metabólicos y hormonales sobre las adaptaciones neuromusculares producidas por el entrenamiento de fuerza aún no han sido suficientemente estudiados. Por ello, se hace necesaria la realización y difusión de estudios rigurosos con verdadero carácter científico que ayuden a mejorar el control del entrenamiento de fuerza, que describan y expliquen las respuestas y los mecanismos físicos y fisiológicos subyacentes a los cambios que se producen en el organismo humano con el ejercicio físico de fuerza, así como la relación entre las distintas manifestaciones de la fuerza, la velocidad y/o la potencia y el rendimiento deportivo. El conocimiento de estos factores es importante para poder prescribir adecuadamente un programa de ejercicio físico encaminado a mejorar el rendimiento neuromuscular del deportista. Estos trabajos deben ayudar a los técnicos deportivos y profesionales de las Ciencias de la Actividad Física y del Deporte a tener visión crítica y poder diferenciar entre el verdadero conocimiento y la información no fundamentada, la publicidad o las modas, tan frecuentes e influyentes en el mundo del deporte y el ejercicio físico en la actualidad.



En esta Tesis Doctoral se han llevado a cabo *tres estudios* en torno a dos cuestiones fundamentales relacionadas con el entrenamiento de fuerza: 1) la prescripción, dosificación y control de la carga de entrenamiento; y 2) el análisis de la respuesta aguda y a largo plazo de dichos protocolos de entrenamiento. Todos los estudios se han realizado tomando como muestra diferentes grupos de adultos (varones jóvenes) con experiencia en el entrenamiento de fuerza muscular.

### **ESTUDIO I:**

Este estudio fue diseñado para analizar y comparar la pérdida de velocidad durante y después de una serie realizada hasta el fallo muscular con distintas intensidades en los ejercicios de sentadilla y press de banca. Se examinó la posibilidad de usar la pérdida de velocidad dentro de la serie como variable para cuantificar el volumen (grado de fatiga) de entrenamiento. Este estudio muestra la aplicación práctica de utilizar la pérdida de velocidad dentro de la serie, junto con la velocidad de la primera repetición, como forma de prescribir y controlar la carga de entrenamiento de fuerza.

### **ESTUDIO II:**

En este estudio se examinó el significado fisiológico y mecánico de distintos tipos de esfuerzo muscular determinados por la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad dentro de cada serie. Se analizó la respuesta fisiológica aguda y el comportamiento mecánico ante 16 protocolos diferentes de esfuerzo muscular realizados en los ejercicios de sentadilla y press de banca. Con ello se ha descrito el efecto agudo que tienen los distintos tipos de esfuerzo estudiados sobre el organismo a nivel metabólico y mecánico. Esto nos ha permitido conocer la relación entre las variables velocidad de ejecución y pérdida de velocidad dentro de la serie y las variables estrés metabólico y mecánico. El análisis de estas relaciones sugiere que la velocidad de ejecución de la primera repetición y la pérdida de velocidad en la serie con los tipos de protocolos analizados son variables válidas para estimar el grado de esfuerzo generado

en cada uno de ellos, pudiendo, por tanto utilizar estas variables para expresar y dosificar la carga de entrenamiento de fuerza.

### **ESTUDIO III:**

Este estudio fue diseñado para analizar el efecto a largo plazo de distintos programas de entrenamiento de fuerza determinados por la intensidad (velocidad de la primera repetición) y el grado de esfuerzo (pérdida de velocidad en la serie) sobre la respuesta mecánica y fisiológica en los ejercicios de sentadilla y press de banca. El efecto del entrenamiento fue evaluado a través de los cambios en la fuerza y la resistencia muscular, el rendimiento en el salto vertical y la capacidad de aceleración. Además, se analizó la respuesta neural, a través de los cambios en la actividad eléctrica muscular (electromiografía de superficie), y los cambios hormonales producidos tras los distintos programas de entrenamiento realizados con diferentes intensidades y pérdidas de velocidad dentro de la serie.

Los estudios llevados a cabo se enmarcan dentro de una línea de investigación actualmente abierta en el Centro de Investigación en Rendimiento Físico y Deportivo de la Universidad Pablo de Olavide de Sevilla, liderada por el profesor Dr. *Juan José González Badillo*, que pretende (1) identificar los principales factores determinantes del rendimiento físico-deportivo, (2) mejorar la dosificación y el control de la carga de entrenamiento, y (3) analizar el efecto agudo y a largo plazo de las cargas de entrenamiento sobre el rendimiento físico.

La presente Tesis doctoral pretende contribuir a la mejora del conocimiento de varias de estas áreas de investigación poniendo su foco principal en uno de los problemas principales en relación con el entrenamiento deportivo, como es la cuantificación, control y dosificación de la carga de entrenamiento, entendida ésta como el grado de esfuerzo o de fatiga que se provoca en cada sesión, tratando de comprobar cuál es el mejor método para controlar el propio grado de esfuerzo, y analizando tanto el efecto que produce un determinado grado de fatiga sobre el rendimiento físico como la

respuesta fisiológica que explica dicho cambio en el rendimiento. El conocimiento de estos aspectos puede contribuir a la mejora de la metodología del entrenamiento actualizando sus medios y métodos de control y dosificación de la carga de entrenamiento, ya que aborda de manera directa dos de los elementos principales del entrenamiento deportivo: 1) la carga que se aplica al sujeto/deportista (carga propuesta), la cual será cuantificada y definida de manera objetiva y precisa a través de la velocidad de la primera repetición y por la pérdida de velocidad dentro de cada serie de entrenamiento; y 2) la señal de salida, la cual incluye el análisis y evaluación del efecto agudo y crónico producido por cada grado de esfuerzo. Esta metodología, en la que el control y la cuantificación de la carga de entrenamiento giran en torno a la velocidad de ejecución, permite un feedback inmediato que podría ayudar a los técnicos y profesionales del acondicionamiento físico a tomar decisiones sobre el *ajuste* de la carga de entrenamiento durante el propio proceso de entrenamiento.

El desarrollo de la presente Tesis Doctoral se inicia con una aproximación al problema general de estudio, analizando sus antecedentes y revisando la literatura existente para conformar una idea del estado actual de conocimiento sobre la cuestión objeto de estudio. A continuación, se define el problema, los objetivos e hipótesis de trabajo. Posteriormente se describe la metodología empleada en cada uno de los estudios llevados a cabo y se discuten y analizan los resultados. Finalmente, se presentan las conclusiones obtenidas así como diversas aplicaciones prácticas que se derivan de los hallazgos encontrados.



## **2. Origen de la Problemática**

### **Objeto de Estudio**





## 2. Origen de la Problemática Objeto de Estudio

El entrenamiento de fuerza (entendido como aquel en el que se realizan ejercicios con cargas externas o resistencias cuyo peso hay que vencer, generalmente en contra de la gravedad, por medio de la acción muscular) juega un papel importante en la mejora de rendimiento deportivo, mostrando un efecto beneficioso sobre la fuerza muscular, la velocidad, la hipertrofia, la resistencia muscular, el equilibrio, la coordinación y el rendimiento motor (Fry, 2004; Harries, Lubans, & Callister, 2012; Kraemer & Ratamess, 2004). De hecho, el progreso en los deportes de alto rendimiento ha venido de la mano del entrenamiento de fuerza, principalmente en especialidades de corta o moderada duración (González-Badillo & Ribas, 2002). Sin embargo, y pese a ser el entrenamiento de fuerza uno de los métodos de entrenamiento más investigado hasta la fecha, aún se desconocen muchos aspectos importantes del mismo.

Tradicionalmente, la realización de ejercicios de fuerza ha sido un tipo de entrenamiento reservado a aquellas personas o deportistas (principalmente culturistas o "bodybuilders") cuya única finalidad era aumentar la masa muscular (Kraemer & Ratamess, 2004), quizás motivado por la falsa creencia de que ejercitarse con pesas o sobrecargas limitaba la movilidad muscular, hacía lentos a los deportistas, era perjudicial para el rendimiento e incluso podía ser nocivo y peligroso para la salud por frenar el normal crecimiento y favorecer la aparición de lesiones músculo-esqueléticas (Blimkie, 1993; Harries, et al., 2012; Hoffman, 2002). Sin embargo, el aumento en el número de publicaciones relacionadas con el entrenamiento de fuerza que se ha producido en las últimas décadas ha hecho que mejore nuestra comprensión sobre los efectos beneficiosos relacionados con el rendimiento deportivo y la salud, haciendo que el entrenamiento de fuerza haya ganado popularidad tanto entre los deportistas y entrenadores como en la sociedad en general. De hecho, el entrenamiento de fuerza es hoy día una forma de ejercicio recomendada por diversas organizaciones nacionales de salud como *"El colegio Americano de Medicina del Deporte"* (American College of Sports Medicine), *La Academia Americana de Pediatría* (The American Academy of Pediatrics) y la *"Asociación Americana de Salud"* (American Heart Association) para todo tipo de poblaciones independientemente de la edad y el nivel físico de los practicantes (Faigenbaum & Micheli, 2000; Faigenbaum & Myer, 2010; Kraemer et al., 2002; Kraemer & Ratamess, 2004).

Como hemos comentado anteriormente, el entrenamiento de fuerza puede inducir incrementos significativos en la producción de fuerza, siempre y cuando la intensidad y duración del periodo de entrenamiento sean suficientes (González-Badillo & Ribas, 2002). Estas ganancias de fuerza se atribuyen a adaptaciones específicas tanto del sistema nervioso como del sistema músculo-esquelético, siendo esto posible gracias a la enorme plasticidad que caracteriza al sistema neuromuscular humano (Coffey & Hawley, 2007; Hoppeler, 2016; Wolpaw & Carp, 2006). Las adaptaciones funcionales y estructurales del tejido muscular ocurren como consecuencia de la aplicación de *estímulos* repetidos. Dependiendo de la intensidad, duración y características de estos estímulos, el tejido muscular experimenta una mezcla particular de cuatro factores de *estrés* fundamentales como son (1) la carga mecánica, (2) la activación neural, (3) los ajustes hormonales y (4) los trastornos metabólicos (Fluck & Hoppeler, 2003; Hoppeler, 2016). El estrés experimentado durante y después de la actividad física es limitado en el tiempo. Sin embargo, estos ponen en marcha una serie de eventos moleculares dentro de las células musculares que tienen como objetivo la preparación de los músculos hacia futuros acontecimientos similares. Estas adaptaciones no solo ofrecen protección para futuras *perturbaciones*, sino que también mejoran el sistema músculo esquelético y el rendimiento de todo el cuerpo en relación con el estrés específico experimentado o el ejercicio realizado (Hoppeler, 2016).

El hecho de llevar a cabo un entrenamiento de fuerza no garantiza, en sí mismo, las óptimas ganancias en fuerza y rendimiento. Las mejoras obtenidas por la aplicación de un entrenamiento de fuerza van a depender de la magnitud del esfuerzo individual y de la organización (p. ej. basado en el estado de rendimiento inicial y en los objetivos a conseguir) de los estímulos de entrenamiento (Kraemer & Ratamess, 2004). Por tanto, la clave para que se produzcan las adaptaciones neuromusculares deseadas reside en diseñar un programa de entrenamiento adecuado. *Programar* consiste en la organización concreta de todos los elementos y factores que intervienen en la planificación de un proceso de entrenamiento (González-Badillo & Ribas, 2002). Esta *organización* se traduce en la expresión de una serie o sucesión ordenada de *esfuerzos* que guardan una relación de dependencia entre sí (González-Badillo & Ribas, 2002). Por este motivo, se hace necesaria la realización de estudios que permitan aumentar nuestro conocimiento en torno a: 1) el control, dosificación y cuantificación de los estímulos de entrenamiento, 2) el significado fisiológico de cada uno de los esfuerzos de



entrenamiento, 3) los mecanismos de adaptación del sistema neuromuscular ante diferentes estímulos de entrenamiento de fuerza, y 4) el efecto / rendimiento que produce cada tipo de estímulo.

En el caso del ejercicio de fuerza, el *estímulo* o la *carga de entrenamiento* viene determinado por un conjunto de componentes denominados *variables agudas de entrenamiento* tales como volumen, intensidad, tipo y orden de los ejercicios, relación entre el tiempo de trabajo y descanso y frecuencia de entrenamiento (Kraemer & Ratamess, 2004). Más recientemente, otros autores han identificado otras variables importantes que influyen directamente en el estímulo de entrenamiento como son la relación entre el número de repeticiones realizadas en función de las que se podrían realizar con una carga determinada (*carácter del esfuerzo*) (González-Badillo & Ribas, 2002; González Badillo, 1992; González Badillo & Gorostiaga, 1995; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) y la velocidad de ejecución (González-Badillo, Rodríguez-Rosell, Sánchez-Medina, Gorostiaga, & Pareja-Blanco, 2014; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pareja-Blanco, et al., 2014; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011; Sánchez-Medina, González-Badillo, Perez, & Pallares, 2014). La forma en la que se manipulen las citadas variables determinará directamente el tipo y magnitud de las respuestas fisiológicas (mecánicas, neurales, metabólicas y hormonales), la respuesta de señalización y, por consiguiente, las adaptaciones neuromusculares al entrenamiento de fuerza (Bird, et al., 2005; Hoppeler, 2016; Kraemer & Ratamess, 2004; Spiering et al., 2008).

El entrenamiento viene determinado por la interrelación entre la *carga real* (conjunto de exigencias biológicas y psicológicas provocadas por las actividades de entrenamiento) y la *carga propuesta* (conjunto de estímulos expresados en forma de entrenamiento a los que se enfrenta el deportista de manera sistemática) (González-Badillo & Ribas, 2002). La carga real es la que se *programa*, mientras que la carga propuesta es la forma a través de la cual se *expresa* la carga real. Por tanto, la tarea fundamental de los entrenadores es: 1) definir la carga de manera precisa y exhaustiva, 2) controlar la relación entre la carga real y la carga propuesta y entre ambas y el rendimiento, y 3) validar modelos de medición y cuantificación de las cargas (González-Badillo & Ribas, 2002). Sin embargo, uno de los principales problemas a los que se enfrentan a diario los entrenadores, preparadores físicos y demás técnicos deportivos es el de cómo cuantificar

y controlar objetivamente la carga real de entrenamiento con el fin último de maximizar el rendimiento de sus deportistas (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010).

La intensidad constituye uno de los elementos básicos para definir la carga de entrenamiento y es, probablemente, la variable más importante a considerar cuando se programa un entrenamiento de fuerza con el objetivo de mejorar el rendimiento físico (Fry, 2004; González-Badillo, Izquierdo, & Gorostiaga, 2006; González-Badillo & Ribas, 2002; Kraemer & Ratamess, 2004), ya que influye de manera significativa en las adaptaciones neuromusculares que se puedan producir como consecuencia de la aplicación de un entrenamiento de fuerza (Spiering, et al., 2008; Toigo & Boutellier, 2006). Esta variable se identifica y se expresa habitualmente como el porcentaje de una repetición máxima (% 1RM) usado para un ejercicio determinado (Fry, 2004; Kraemer & Ratamess, 2004). Sin embargo, la intensidad representa algo más que *la carga empleada* y debería entenderse como el *grado de esfuerzo* que exige la realización de un ejercicio, en cada unidad de acción (repetición), en relación a las posibilidades actuales del sujeto (González-Badillo & Ribas, 2002).

Aunque es realmente útil y frecuente en la práctica del entrenamiento con sobrecargas expresar la intensidad como porcentaje de 1RM debido a que (1) se puede programar el entrenamiento para muchos deportistas al mismo tiempo, y (2) permite reflejar muy claramente la dinámica de la evolución de la carga si el porcentaje de 1RM es considerado realmente como un esfuerzo y no como un simple cálculo aritmético (Fry, 2004; González-Badillo & Ribas, 2002), expresar la intensidad de esta forma presenta también algunos inconvenientes importantes, especialmente cuando se requiere controlar con precisión el grado real de esfuerzo alcanzado en cada sesión de entrenamiento. Los principales problemas derivan de la necesidad de cuantificar el valor de 1RM para cada deportista, y son los siguientes (González-Badillo & Ribas, 2002; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010):

- La medición directa de la RM podría suponer un esfuerzo excesivo para sujetos jóvenes o inexpertos (Braith, Graves, Leggett, & Pollock, 1993) e incluso para deportistas de alto nivel cuyas especialidades no presenten altas exigencias de fuerza muscular (González-Badillo & Ribas, 2002).
- Es un procedimiento que requiere cierto tiempo, siendo poco práctico para grupos numerosos, y puede producir lesiones musculoesqueléticas si no se lleva

a cabo correctamente (Braith, et al., 1993; Brzycki, 1993; Mayhew, Ball, Arnold, & Bowen, 1992).

- El valor real de la RM puede cambiar bastante rápido después de tan solo unas pocas sesiones de entrenamiento, sobre todo cuando se trata de sujetos poco entrenados (González-Badillo & Ribas, 2002; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010). Este hecho haría necesario un control continuo de su valor para ajustar las cargas de entrenamiento conforme al nuevo estado de rendimiento. Sin embargo, la constante realización de tests de 1RM podría suponer un estrés incluso mayor que el propio entrenamiento, lo cual podría influir de manera notable sobre las adaptaciones que el entrenamiento programado podría producir.
- La medición de la RM puede ser poco precisa cuando se trata de sujetos inexpertos (González-Badillo & Ribas, 2002; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010).

Un método alternativo a la medición directa de la 1RM para prescribir la intensidad del entrenamiento en los ejercicios de fuerza consiste en determinar el número máximo de repeticiones que se pueden realizar con un peso determinado (p.ej. 6RM, 10RM, 20RM). Son varios los estudios (Hoeger, Hopkins, Barette, & Hale, 1990; Izquierdo et al., 2006; Sakamoto & Sinclair, 2006) que han demostrado la fuerte relación existente entre la carga usada (% 1RM) y el número de repeticiones máximas que pueden ser realizadas, estableciendo un *continuum* de repeticiones máximas (Kraemer, Fleck, & Deschenes, 1988). Aunque, en general, los resultados de estas ecuaciones se aproximan a la verdadera RM de un sujeto, hay que tener en cuenta que la precisión de las fórmulas empleadas disminuye conforme el número de repeticiones realizadas es mayor de las 10 ó 12, además de considerar las posibles diferencias existentes entre sujetos (Brzycki, 1993; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Reynolds, Gordon, & Robergs, 2006). Es cierto que expresar la intensidad mediante el número de repeticiones máximas elimina la necesidad de realizar un test para determinar la fuerza dinámica máxima de un deportista, con todos los aspectos negativos que conlleva; sin embargo, este método tampoco está exento de problemas. De hecho, la realización de un test de máximo número de repeticiones con una determinada carga puede producir un grado de fatiga igual o superior al propio test de 1RM, ya que la última repetición se realizaría siempre

a la velocidad propia de la repetición máxima. En este sentido, son varios los estudios en los que se ha mostrado que la realización de esfuerzos hasta el fallo muscular produce un aumento de las concentraciones de lactato, amonio, creatín kinasa (CK), cortisol, testosterona, hormona de crecimiento (GH) y prolactina, así como una disminución de la actividad eléctrica muscular y de la variabilidad de la frecuencia cardiaca (González-Badillo et al., 2016; Gorostiaga, Navarro-Amezqueta, González-Izal, et al., 2012; Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, Sánchez-Medina, Ribas-Serna, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Todos estos cambios son indicadores claros de fatiga y de deterioro de la función neuromuscular, los cuales se ven reflejados en una disminución en la capacidad de aplicar fuerza (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Por tanto, el alto grado de estrés y de fatiga que se generan cuando se lleva a cabo un test de repeticiones máximas parecen indicar que la realización de este tipo de tests no es recomendable para la determinación o estimación de la fuerza dinámica máxima, sobre todo teniendo en cuenta la necesidad continua que existe de ajustar la *carga propuesta* durante el proceso de entrenamiento, ya que esto supondría realizar un test de máximo número de repeticiones cada poco tiempo. Así, aunque el ejercicio de fuerza usando series de esfuerzos exhaustivos ha sido y es práctica habitual en el entrenamiento de fuerza, un número cada vez mayor de investigaciones comienza a mostrar que un entrenamiento usando series hasta el fallo no produce necesariamente mayores ganancias de fuerza que otro realizado sin llegar al fallo, y que la repetición de este tipo de esfuerzos puede inducir efectos negativos sobre la producción de fuerza en la unidad de tiempo (*rate of force development*) y la velocidad de ejecución (Andersen, Andersen, Zebis, & Aagaard, 2010; Pareja-Blanco, Rodríguez-Rosell, Sánchez-Medina, Sanchis-Moysi, et al., 2016), así como transformaciones no deseadas hacia isoformas más lentas en la expresión de la miosina de las fibras musculares (Andersen et al., 2005; Fry, 2004; Pareja-Blanco, et al., 2016).

Las limitaciones antes mencionadas en relación con la determinación de la intensidad sugieren la necesidad de encontrar mejores formas de llevar a cabo un control objetivo de la carga de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza muscular. Estudios recientes (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, Sánchez-Medina, Perez, De La Cruz-Sánchez, & Mora-Rodríguez, 2014; Sánchez-Medina, et al., 2014) han puesto su foco en el uso de la velocidad de ejecución como indicador de la intensidad relativa

durante el entrenamiento de fuerza. Los resultados de estos estudios muestran que existe una fuerte relación entre la velocidad de levantamiento y la carga relativa (%1RM) en diferentes ejercicios tales como el press de banca (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2014), la sentadilla completa (Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, García-Pallarés, Pérez, Fernandes, & González Badillo, 2011; Sánchez-Medina, Pallarés, Pérez, Morán-Navarro, & González-Badillo, 2017) y el tirón en banco horizontal (Sánchez-Medina, et al., 2014). Estos hallazgos demuestran que es posible estimar con suficiente precisión qué porcentaje de 1RM se está utilizando en cuanto se realiza la primera repetición, a la máxima velocidad posible, con un peso (kg) determinado (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010). Por tanto, el uso de la velocidad de ejecución para la determinación de la intensidad del entrenamiento soluciona en gran medida los inconvenientes asociados con el uso de los métodos tradicionales (test de 1RM y test de repeticiones máximas).

Por otro lado, la intensidad, por sí sola, no es suficiente para definir el *estímulo* o la *carga* de entrenamiento y debe venir asociado con otros componentes de la carga, especialmente con el volumen (González-Badillo & Ribas, 2002). El volumen de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza viene determinado, generalmente, por el número total de repeticiones realizadas durante la sesión (Bird, et al., 2005; Hass, et al., 2001; Kraemer & Ratamess, 2004). En este sentido, cuando se prescribe el volumen de entrenamiento, la mayoría de los estudios han fijado un número determinado de repeticiones a realizar dentro de cada serie de entrenamiento ante una carga dada. Sin embargo, el número de repeticiones que puede ser completado ante una intensidad relativa determinada muestra una gran variabilidad entre sujetos (Izquierdo, et al., 2006; Richens & Cleather, 2014; Sakamoto & Sinclair, 2006; Shimano et al., 2006; Terzis, Spengos, Manta, Sarris, & Georgiadis, 2008). Por tanto, si un grupo de sujetos realiza un mismo número de repeticiones por serie ante una misma intensidad relativa, es muy probable que el grado de fatiga inducido por el entrenamiento sea diferente para cada uno de ellos, ya que la pérdida de fuerza y velocidad experimentada por cada sujeto en cada una de las series de entrenamiento puede ser distinta. Dado que el estímulo mecánico asociado con el ejercicio de fuerza es uno de los factores más importantes para determinar las adaptaciones inducidas por el entrenamiento (Crewther, Cronin, & Keogh, 2005; Spiering, et al., 2008; Toigo & Boutellier, 2006), dada una determinada

intensidad relativa, es necesario encontrar un método de control del volumen de entrenamiento que permita conocer con suficiente precisión la dosis de *carga de entrenamiento*, tomando para ello como referencia el grado de fatiga alcanzado dentro de cada serie de entrenamiento.

La fatiga es un fenómeno complejo y multifactorial cuya etiología no ha sido completamente determinada y sobre la que existe gran controversia (Allen, Lamb, & Westerblad, 2008; Enoka & Duchateau, 2008; Enoka & Stuart, 1992). La fatiga se manifiesta a través de una reducción involuntaria de la fuerza, la potencia y la velocidad de acortamiento muscular inducida por la realización de un ejercicio (Allen, et al., 2008; Enoka & Duchateau, 2008). El grado en el que se reduzca la fuerza, la velocidad y la potencia determinará el estímulo mecánico asociado con el entrenamiento (Spiering, et al., 2008; Toigo & Boutellier, 2006). Por este motivo, algunos autores han indicado que es necesario realizar un mayor número de estudios que analicen la respuesta cinética y cinemática durante el ejercicio de fuerza para mejorar nuestra comprensión sobre cómo optimizar la fuerza y la potencia muscular (Crewther, et al., 2005). En relación con lo anterior, existen varios estudios que han propuesto el uso de la potencia como variable para controlar el entrenamiento de fuerza (Bosco, 1998; Tidow, 1995). Normalmente, este tipo de entrenamientos consisten en levantar una carga con la que se obtiene la máxima potencia en un ejercicio determinado y realizar repeticiones hasta que la potencia alcanzada durante una repetición sea menor a un determinado porcentaje del máximo (p. ej. 90% o 95%) (Baker & Newton, 2007). Sin embargo, el control del entrenamiento a través de la potencia presenta varias limitaciones: 1) la potencia mecánica es una medida indirecta que se calcula como el producto de la fuerza por la velocidad ( $\text{potencia} = \text{fuerza} \times \text{velocidad}$ ), por tanto, es necesario disponer de un instrumento capaz de medir la fuerza, preferiblemente de manera directa, y que al mismo tiempo mida la velocidad, lo cual no es común; 2) se ha encontrado una gran variabilidad en la carga que maximiza la potencia (20–80% 1RM) dependiendo del método usado para medir la potencia y del tipo de ejercicio evaluado (Cormie, McBride, & McCaulley, 2007; Cronin, McNair, & Marshall, 2000; Kawamori et al., 2005); y 3) dada la relación curvilínea de la potencia con respecto a la fuerza y la velocidad, un mismo valor de potencia se puede alcanzar con valores muy distintos de fuerza y velocidad, por lo que un mismo valor de potencia significará dos estímulos muy

diferentes. Por tanto, no parece conveniente usar la potencia para controlar el volumen de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza.

Con el fin de abordar la problemática relacionada con el control del volumen de entrenamiento, diversos estudios han puesto su foco en la velocidad de ejecución. Ya en el año 1991, el Profesor González-Badillo indicó que *“Si pudiéramos medir la velocidad máxima de los movimientos de cada día y con información inmediata, éste sería posiblemente el mejor punto de referencia para saber si el peso es adecuado o no. Un descenso determinado de la velocidad es un indicador válido para suspender el entrenamiento o bajar el peso de la barra”* (González-Badillo, 1991). Esta hipótesis sobre el control del entrenamiento ha podido ser comprobada recientemente a través de la publicación de varios trabajos de investigación impulsados por el propio González-Badillo y su grupo de trabajo. En uno de estos estudios (Izquierdo, et al., 2006) se mostró que la velocidad de levantamiento descendía progresivamente a medida que el incrementaba el número de repeticiones realizadas durante una serie realizada hasta el fallo muscular realizando cada repetición a la máxima velocidad posible. Además, el patrón de descenso de velocidad durante la serie fue similar para todas las cargas evaluadas, las cuales oscilaron entre el 60% y el 75% 1RM (Izquierdo, et al., 2006). Por otro lado, estudios más recientes (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) han demostrado que la pérdida de velocidad alcanzada dentro de la serie muestra una alta relación con la fatiga mecánica (pérdida de altura de salto y pérdida de velocidad ante una carga absoluta determinada), la respuesta metabólica (lactato y amonio), los cambios hormonales (cortisol, prolactina, testosterona) y enzimáticos (creatín kinasa), así como los cambios en la variabilidad de la frecuencia cardiaca. Estos resultados parecen indicar que se puede utilizar la pérdida de velocidad alcanzada dentro de la serie como una variable adecuada para cuantificar el grado de fatiga neuromuscular durante el ejercicio de fuerza (Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Por tanto, tomados de manera conjunta, los hallazgos de los estudios mencionados anteriormente (González-Badillo, et al., 2016; Izquierdo, et al., 2006; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), la pérdida de velocidad en la serie puede tener importantes aplicaciones prácticas para la prescripción y el control del volumen de entrenamiento. Sin embargo, parece necesario llevar a cabo estudios que permitan conocer con más detalle el patrón de descenso de la velocidad de ejecución para poder cuantificar el

porcentaje de repeticiones realizadas con respecto al máximo número que pueden ser completadas ante una determinada pérdida de velocidad alcanzada en función de la carga y el tipo de ejercicio utilizado durante el entrenamiento de fuerza. En la presente Tesis Doctoral, en su **Estudio I**, hemos abordado la cuestión de la utilización de la pérdida de velocidad dentro de la serie como variable para cuantificar el grado de esfuerzo durante el ejercicio de fuerza y poder así controlar el volumen de entrenamiento.

Por otra parte, determinar cuáles son los aspectos mecánicos y fisiológicos subyacentes al entrenamiento de la fuerza es fundamental para mejorar nuestra comprensión de los estímulos que influyen en las adaptaciones neuromusculares (Crewther, et al., 2005), y poder así aplicar estímulos más adecuados para la mejora del rendimiento deportivo (González-Badillo & Ribas, 2002). Y es que, como hemos indicado anteriormente, la elección de diferentes combinaciones de las variables que conforman la carga de entrenamiento de fuerza va a suponer estímulos muy diferentes para el organismo (Kraemer & Ratamess, 2004; Spiering, et al., 2008; Toigo & Boutellier, 2006). Por tanto, parece fundamental llevar a cabo investigaciones que nos permitan conocer cómo modular la respuesta orgánica (neuromuscular, metabólica y endocrina) modificando las principales variables (*volumen e intensidad*) que definen la carga de entrenamiento.

Diferentes estudios han analizado la respuesta mecánica y fisiológica ante diferentes intensidades expresadas como repeticiones máximas (p. ej., 10RM vs. 5RM) (Kraemer, Dziados, et al., 1993; Kraemer, Fleck, et al., 1993; Kraemer et al., 1990; Leite et al., 2011; Smilios, Piliandis, Karamouzis, & Tokmakidis, 2003), ante protocolos de entrenamiento en los que se compara el efecto de realizar el máximo número de repeticiones posibles en cada serie (fallo muscular) o no ante la misma intensidad (p. ej. 10RM vs. 5 repeticiones con la carga que se podrían hacer 10RM) (González-Badillo, et al., 2016; Gorostiaga, Navarro-Amezqueta, Calbet, et al., 2012; Gorostiaga et al., 2014; Gorostiaga, et al., 2012; Pareja-Blanco, et al., 2016) e, incluso, se ha analizado la diferencia entre realizar repeticiones hasta el fallo muscular y “*repeticiones forzadas*” (con ayuda) (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Ahtiainen, Pakarinen, Kraemer, & Hakkinen, 2003, 2004; Gentil et al., 2006). Por último, un reciente estudio (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) analizó la respuesta mecánica y metabólica aguda ante diferentes esfuerzos en los que se manipuló el número de repeticiones realizadas en cada serie con respecto al máximo número que podían ser completadas ante una carga



determinada. Los resultados de este estudio profundizaron en la validez y la utilidad práctica del concepto del *carácter del esfuerzo* (relación entre el grado de exigencia demandado por la realización de un determinado esfuerzo físico y las posibilidades actuales/reales del sujeto en un momento determinado, es decir, la relación entre lo realizado y lo realizable) (González-Badillo & Ribas, 2002; González Badillo & Gorostiaga, 1995) como una forma de controlar y dosificar el entrenamiento. Sin embargo, a raíz de los estudios publicados en relación al control de la velocidad de ejecución (González-Badillo, et al., 2014; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Izquierdo, et al., 2006; Pareja-Blanco, et al., 2014; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), en vez de un peso y un número de repeticiones determinado, el *grado de esfuerzo* durante el entrenamiento de fuerza se debería programar en función de dos variables (González-Badillo, Marques, & Sánchez-Medina, 2011; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011): la velocidad de la primera repetición, la cual está intrínsecamente relacionada con la intensidad de la carga (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2011; Sánchez-Medina, et al., 2014) y la pérdida de velocidad dentro de cada serie (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011).

Por este motivo, parte de la investigación descrita en esta Tesis Doctoral se centra específicamente en analizar la respuesta mecánica y fisiológica aguda (**Estudio II**) y a largo plazo (**Estudio III**) de distintos protocolos de entrenamiento de fuerza determinados por la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad dentro de la serie, una cuestión que todavía no ha sido abordada en la disciplina del entrenamiento deportivo y, más concretamente, del ejercicio de fuerza muscular.



# **3. Estado Actual del Conocimiento**





### 3. Estado Actual del Conocimiento

#### 3.1. Componentes que definen la carga de entrenamiento de fuerza

Durante muchos años, diseñar un programa de entrenamiento ha sido más un arte que una ciencia, sin embargo, la ciencia es una parte esencial del proceso, ya que la prescripción de cualquier ejercicio requiere de la comprensión de los principios subyacentes implicados en el proceso (Bird, et al., 2005). Por tanto, diseñar un programa de entrenamiento de fuerza es un proceso complejo en el que intervienen múltiples factores y en el que hay que tener en cuenta varios principios del entrenamiento (sobrecarga, especificidad, progresión e individualización) que rigen la seguridad y la efectividad de dicho entrenamiento (Bird, et al., 2005; Kraemer & Ratamess, 2004).

La efectividad de un entrenamiento de fuerza para alcanzar un objetivo determinado depende directamente de la manipulación de las llamadas *variables agudas* de entrenamiento, las cuales determinan el estímulo de entrenamiento (Bird, et al., 2005; Hoppeler, 2016; Spiering et al., 2008; Tidow, 1995). Como ejemplos de estas *variables agudas* de entrenamiento tendríamos: intensidad; volumen; tipo y orden de ejercicios a emplear; tipo de acción muscular; tiempo de recuperación entre repeticiones, series y ejercicios; velocidad de ejecución de los ejercicios; y frecuencia de entrenamiento (Bird, et al., 2005; González-Badillo & Ribas, 2002; Haff et al., 2003; Kraemer & Ratamess, 2004; Lawton, Cronin, & Lindsell, 2006; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Todas estas variables pueden combinarse de múltiples maneras con el objetivo de conseguir un determinado efecto de entrenamiento. De hecho, la forma en la que se manipulen estas variables influirá en el estímulo de entrenamiento, determinando la magnitud de la respuesta neuromuscular y neuroendocrina aguda que influye a su vez sobre las respuestas celulares y moleculares que finalmente producen las adaptaciones musculares (Bird, et al., 2005; Hoppeler, 2016; Spiering, et al., 2008).

##### 3.1.1. Intensidad

La intensidad se expresa habitualmente en términos absolutos, a través del peso en kg utilizado en cada serie, o en términos relativos, mediante el porcentaje que representa

dicho peso del máximo que el atleta puede levantar una sola vez en ese ejercicio (Bird, et al., 2005; González-Badillo & Ribas, 2002; Kraemer & Ratamess, 2004). Dicho máximo es lo que se conoce comúnmente como una repetición máxima (1RM). A pesar de esta simple definición, la intensidad es una variable compleja que debe entenderse no sólo como los kilogramos levantados durante un ejercicio de fuerza, sino como el grado de esfuerzo desarrollado en cada unidad de acción (repetición) al realizar un ejercicio o actividad de entrenamiento (González-Badillo & Ribas, 2002).

Diversos autores han indicado que la intensidad es probablemente la variable más importante a considerar cuando se diseña un programa de entrenamiento de fuerza con el objetivo de mejorar el rendimiento físico (Bird, et al., 2005; Fry, 2004; McDonagh & Davies, 1984a; Spiering, et al., 2008; Tan, 1999). A pesar de ello, la intensidad por sí sola no es suficiente para definir la carga de entrenamiento, y debe venir acompañada de otras variables, principalmente el volumen y el tipo de ejercicio (González-Badillo & Ribas, 2002). Además, se han propuesto multitud de definiciones para esta variable y, por tanto, existe cierta controversia a la hora de determinar cuál es la mejor forma de determinar y expresar la intensidad del entrenamiento.

La forma más común y sencilla de expresar la intensidad ha sido a través del porcentaje de la repetición máxima (% 1RM). La principal ventaja de éste método es que permite programar el entrenamiento para muchos deportistas al mismo tiempo, ya que un mismo esfuerzo para todos los sujetos se puede expresar en términos relativos (% 1RM) y cada cual calcular el peso con el que debería realizar su entrenamiento. Otra ventaja importante que tiene esta forma de expresión de la intensidad es que permite reflejar muy claramente la dinámica de la evolución de la carga, obteniendo una información muy valiosa acerca de cuál es el sistema de trabajo y la exigencia de entrenamiento que se está proponiendo (Fry, 2004; González-Badillo & Ribas, 2002). Sin embargo, la utilización de % 1RM como forma de expresar la intensidad del entrenamiento también tiene importantes inconvenientes (Braith, Graves, Leggett, & Pollock, 1993; González-Badillo & Ribas, 2002; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Rontu, Hannula, Leskinen, Linnamo, & Salmi, 2010). En primer lugar, la medición directa de la RM implica la utilización de altas cargas, lo que podría ser perjudicial para sujetos jóvenes o con poca experiencia en el entrenamiento de fuerza porque aumenta el riesgo de lesión. Además, es probable que los resultados obtenidos en este tipo de población no sean fiables, ya que los sujetos no serían capaces de manifestar su fuerza máxima real. Por

otro lado, dado que el valor de la RM puede cambiar de un día a otro, podría ocurrir con frecuencia que el peso seleccionado como expresión del porcentaje teórico que hemos calculado para una sesión concreta de entrenamiento no se corresponda con el que correspondería al valor de la RM real del día de entrenamiento. Esto se puede producir tanto por defecto como por exceso. También puede ocurrir que no se haya hecho correctamente la medición de la RM, con lo que el valor calculado no sería fiable. Además, es obvio pensar que los deportistas cambian su rendimiento de fuerza durante el propio proceso de entrenamiento y no justo al finalizar un programa de entrenamiento. Para conocer esos cambios sería necesario realizar continuamente un test de 1RM para ajustar las cargas de entrenamiento. Esto necesitaría de una inversión de tiempo y esfuerzo muy importante que a veces es imposible de ajustar dentro de las sesiones de entrenamiento, además de que la realización continua de un test de 1RM supondría un estímulo en sí mismo (incluso mayor que el propio entrenamiento) que podría interferir con los objetivos perseguidos.

Debido a los inconvenientes antes mencionados en relación con la medición directa de 1RM, se han utilizado otras formas alternativas para expresar la intensidad del ejercicio de fuerza. Una de ellas ha sido utilizando como referencia el número total de repeticiones que se puede realizar en una serie (Bird, et al., 2005; Fry, 2004). Esto es, el máximo peso que un individuo puede levantar un número de veces determinado (Fry, 2004). Ejemplos de esta forma de prescribir la intensidad son: 12RM, 10RM, 8RM, 6RM, 5RM, etc. Cuando se emplean las repeticiones por serie como expresión de la intensidad del entrenamiento de fuerza, lo que se programa es la realización de un número concreto de repeticiones máximas, lo que se suele asociar con un porcentaje determinado de 1RM. Sin embargo, si bien es cierto que existen varios estudios en los que se indica el número medio de repeticiones máximas que se pueden realizar con un determinado porcentaje de 1RM, también es cierto que existe una gran variabilidad inter-sujeto (Izquierdo et al., 2006a; Sakamoto & Sinclair, 2006; Terzis, Spengos, Manta, Sarris, & Georgiadis, 2008), lo cual indicaría que ante el mismo número de repeticiones máximas, las intensidades relativas podrían ser distintas. Además, parece que el tipo de ejercicio, la masa muscular implicada, la técnica y la forma de realizar dicho ejercicio (González-Badillo & Ribas, 2002; Izquierdo, et al., 2006a) también influyen directamente en el número de repeticiones máximas que se pueden realizar con un porcentaje de 1RM determinado. Por tanto, un determinado porcentaje de la RM no

siempre permitirá realizar el mismo número de repeticiones en todos los sujetos, ni en todos los ejercicios. Debido a esto, si varios deportistas realizan el mismo número de repeticiones máximas durante cada serie de entrenamiento, es posible que cada uno de ellos esté utilizando una intensidad relativa (% 1RM) diferente durante dicho entrenamiento, y como consecuencia, cada uno de ellos estará experimentando un estrés mecánico y metabólico distinto.

Para solucionar esta problemática relacionada con el control de la intensidad, en recientes estudios han propuesto que la velocidad de ejecución es la mejor forma de expresar objetivamente la intensidad del entrenamiento (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2017). Los resultados de estos estudios indican que existe una fuerte relación entre la velocidad de levantamiento y la intensidad relativa (%1RM) en diferentes ejercicios, de tal manera que es posible estimar con gran precisión qué porcentaje de 1RM se está utilizando en cuanto se realiza la primera repetición, a la máxima velocidad posible, con un peso (kg) determinado (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010). De esta manera, en cada sesión de entrenamiento se modifica el peso a levantar (*carga propuesta*) para ajustarlo a la velocidad objetivo (*carga real*) propuesta para dicha sesión de entrenamiento. Por tanto, el uso de la velocidad de ejecución permite ajustar las cargas de entrenamiento de una manera sencilla y rápida, solucionando en gran medida los inconvenientes asociados con el uso del test de 1RM o los tests de repeticiones máximas.

### 3.1.2. Volumen

El volumen hace referencia a la cantidad total de trabajo realizado en un tiempo determinado, ya sea en una sesión de entrenamiento, en una semana, un ciclo completo, o en una temporada (Bird, et al., 2005; Tan, 1999). La forma más común de expresar el volumen es por medio del número de repeticiones que se realiza (Volumen total = número de series  $\times$  Número de repeticiones por serie) (Baker, Wilson, & Carlyon, 1994; Bird, et al., 2005; Tan, 1999), ya que esto tiene relación directa con el tiempo bajo tensión o duración del estímulo (González-Badillo & Gorostiaga, 1995).



Al igual que la intensidad, el control del volumen durante el ejercicio de fuerza es un factor crítico para alcanzar los objetivos específicos de entrenamiento (Kraemer & Ratamess, 2004). De hecho, el volumen tiene efectos sobre la respuesta neural (Hakkinen, Komi, Alen, & Kauhanen, 1987), hipertrófica (Tesch, Komi, & Hakkinen, 1987), metabólica (Ratamess et al., 2007; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) y hormonal (Mulligan et al., 1996). Además, algunos autores han indicado que la interrelación entre la intensidad y el volumen es el elemento clave que determina el estímulo de entrenamiento, y como consecuencia, las adaptaciones neuromusculares asociadas con el entrenamiento de fuerza (Bird, et al., 2005; Tan, 1999).

Con respecto al número de series, hay gran cantidad de literatura que indica que la realización de varias series de entrenamiento produce un mayor efecto sobre el rendimiento neuromuscular que realizar solo una serie de entrenamiento (Atha, 1981; Behm, 1995; Berger, 1962; Clarke, 1973; Fleck & Kraemer, 1988; Kraemer & Fleck, 1988; Kraemer & Ratamess, 2004; Sooneste, Tanimoto, Kakigi, Saga, & Katamoto, 2013). Estos estudios sugieren que realizar entre 2 y 6 series (e incluso 8 series) puede ser un estímulo de entrenamiento adecuado para producir un incremento significativo en la fuerza muscular tanto en sujetos entrenados como no entrenados (Kraemer & Fleck, 1988; Kraemer & Ratamess, 2004; Peterson, Rhea, & Alvar, 2004, 2005). Sin embargo, revisiones más recientes (Carpinelli, 2002, 2004; Carpinelli & Otto, 1998) parecen indicar que los estudios publicados hasta la fecha en los que se compara realizar una frente a varias series de entrenamiento con el mismo número de repeticiones por serie (Berger, 1962, 1972; Chestnut & Docherty, 1999; W. J. Stone & Coulter, 1994) no soportan estas recomendaciones, ya que no se observan diferencias significativas entre las diferentes condiciones de entrenamiento. Consecuentemente, Carpinelli & Otto (1998) aconsejan que tanto las personas físicamente activas como los atletas de competición deberían realizar el mínimo volumen que le permita alcanzar los objetivos del entrenamiento planteados y no el máximo volumen que pueden tolerar. Estas recomendaciones están en concordancia con los resultados mostrados por estudios más recientes con halterófilos de alto nivel (González-Badillo, Gorostiaga, Arellano, & Izquierdo, 2005; González-Badillo, et al., 2016) en los que se ha podido constatar que realizar el máximo volumen de trabajo posible no produce los mayores efectos sobre la mejora de la fuerza.

En relación con el número de repeticiones por serie, las recomendaciones se han limitado a lo siguiente (Bird, et al., 2005; Kraemer & Ratamess, 2004): 1) 15-20RM para obtener mejoras en la resistencia muscular; 2) 8-15RM para producir hipertrofia muscular; 3) 3-8RM para inducir mejoras en la fuerza máxima; 4) 1-3RM para producir mejoras en la potencia muscular. Uno de los motivos por los que aún no se ha estudiado cuál es la mejor forma de cuantificar el volumen durante cada serie de entrenamiento es porque existe la creencia de que el entrenamiento de fuerza siempre tiene que ser llevado a cabo realizando el máximo número de repeticiones posibles en cada serie de entrenamiento (fallo muscular) (Drinkwater et al., 2005; Kraemer & Ratamess, 2004; Willardson, Emmett, Oliver, & Bressel, 2008). Sin embargo, cada vez hay un mayor número de estudios que parecen indicar que realizar un programa de entrenamiento alcanzando el fallo muscular en cada serie no produce mayores beneficios sobre la fuerza muscular que realizar, por ejemplo, la mitad de las repeticiones posibles dentro de cada serie (Izquierdo et al., 2006b; Pareja-Blanco et al., 2016b). Además, los entrenamientos llevados a cabo hasta el fallo muscular producen un mayor estrés mecánico, metabólico y hormonal (González-Badillo et al., 2016; Pareja-Blanco et al., 2016a; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), y su uso continuado produce un deterioro considerable en la capacidad de aplicar fuerza en la unidad de tiempo (RFD) (Andersen et al., 2005; Andersen, et al., 2010) y un descenso en la habilidad para realizar acciones de alta velocidad como el salto y el sprint (Pareja-Blanco, et al., 2016b). A pesar de estas evidencias, aún no sabemos qué volumen es el que produce los mejores beneficios dependiendo de las características de los sujetos y de los objetivos. En este sentido, es muy importante intentar conocer el volumen óptimo de trabajo de fuerza para cada especialidad deportiva en general y para cada deportista en particular a lo largo de las distintas fases o etapas de su preparación. Y es que, aunque encontrar los parámetros óptimos de carga sea la tarea más difícil a la que se enfrentan diariamente los entrenadores e investigadores relacionados con las ciencias del deporte, esto constituye la esencia misma (el objeto principal) de todas las investigaciones relacionadas con el entrenamiento deportivo (González-Badillo & Ribas, 2002).

### **3.1.3. Tiempo de recuperación entre series y entre repeticiones**

Aunque la mayoría de las investigaciones relacionadas con las mejoras del rendimiento físico se han centrado en determinar cuáles son las estrategias óptimas de manipulación del volumen y la intensidad, otras variables como el tiempo de recuperación entre series o repeticiones también juegan un papel importante en la respuesta fenotípica al ejercicio de fuerza (Schoenfeld et al., 2016).

La magnitud de la respuesta hormonal y neuromuscular aguda inducida por el ejercicio de fuerza se considera un importante indicador de los cambios neuromusculares que se puede producir durante un periodo de entrenamiento de fuerza (Spiering, et al., 2008; Toigo & Boutellier, 2006). De acuerdo con estudios previos (Kraemer, 1988; Kraemer et al., 1993; Kraemer et al., 1990; Smilios, Pilianidis, Karamouzis, & Tokmakidis, 2003), la respuesta endocrina durante un entrenamiento de fuerza es mayor cuando el tiempo de recuperación entre series disminuye. Por este motivo, generalmente se ha recomendado el uso de cortos periodos de recuperación (60 - 120 s) entre series para inducir un mayor grado de hipertrofia muscular (Ahtiainen, Pakarinen, Alen, Kraemer, & Hakkinen, 2005; Kraemer, et al., 1990; Kraemer, Noble, Clark, & Culver, 1987), mientras que tiempos de recuperación entre series más largos son importantes cuando el objetivo que se persigue es la consecución de altas velocidades de ejecución y/o la elevada producción de potencia mecánica en un determinado ejercicio (Willardson & Burkett, 2006a, 2006b). A pesar de estas recomendaciones, los estudios experimentales en los que se han analizado la influencia del tiempo de recuperación entre series sobre la mejora de la fuerza y el incremento de la masa muscular han mostrado resultados contradictorios. Mientras que algunos estudios no encuentran diferencias significativas entre dejar un mayor o menor tiempo de recuperación entre series (Ahtiainen, et al., 2005; Garcia-Lopez et al., 2007; Simão, Polito, & Monteiro, 2008; Willardson & Burkett, 2008), otros muestra que un mayor tiempo de recuperación entre series produce un mayor efecto sobre el incremento de la fuerza y la hipertrofia muscular que entrenamientos con menor tiempo de recuperación entre series (de Salles et al., 2010; Hill-Haas, Bishop, Dawson, Goodman, & Edge, 2007; Robinson et al., 1995; Schoenfeld, et al., 2016). Sin embargo, contrario a las recomendaciones propuestas por algunos autores (Kraemer & Ratamess, 2004), no conocemos ningún estudio longitudinal que muestre mayores incrementos de la fuerza y la masa muscular cuando se utiliza un menor tiempo de recuperación entre series en comparación con mayores tiempos de recuperación. En algunos trabajos se ha propuesto que el incremento de la

fuerza y el grado de hipertrofia muscular se producen como consecuencia del trabajo mecánico realizado durante el entrenamiento (Spiering, et al., 2008; Toigo & Boutellier, 2006). Además, parece que a medida que disminuye el tiempo de recuperación entre series, menor es el número de repeticiones que se puede completar en las series sucesivas (de Salles et al., 2009; Miranda et al., 2009; Scudese et al., 2015), lo que significa un menor trabajo mecánico total. Por tanto, un menor tiempo de recuperación entre series permite un menor grado de recuperación antes de la siguiente serie, lo que hace que se reduzca el número de repeticiones que se puede realizar ante una misma carga absoluta. Esto significa un menor trabajo mecánico y como consecuencia, según estos estudios, un menor incremento de la fuerza muscular.

En conclusión, el descanso entre series es una importante variable a tener en cuenta cuando se prescribe un programa de entrenamiento de fuerza, ya que influye directamente en la respuesta mecánica, metabólica, hormonal y cardiovascular (Kraemer & Ratamess, 2004). Dicho periodo de descanso debería estar en relación con la intensidad del entrenamiento, los objetivos del entrenamiento y el nivel de condición física de los participantes, ya que el tiempo de recuperación entre series por sí solo no puede asegurar ningún efecto si los otros componentes principales de la carga (volumen e intensidad) no se prescriben adecuadamente (Willardson & Burkett, 2006a, 2006b).

En cuanto al tiempo de recuperación entre repeticiones, la mayoría de los estudios indican que, ante un mismo número de repeticiones por serie, añadir un tiempo de recuperación entre repeticiones o grupo de repeticiones disminuye el grado de fatiga mecánica y el estrés metabólico producido durante y después de dicha serie de entrenamiento en comparación con realizar la serie sin descanso entre repeticiones (García-Ramos et al., 2015; Girman, Jones, Matthews, & Wood, 2014; Hardee, Triplett, Utter, Zwetsloot, & McBride, 2012; Iglesias-Soler et al., 2012). Por tanto, la introducción de un tiempo de recuperación entre repeticiones permitiría realizar un mayor número de repeticiones a una mayor velocidad, lo cual podría repercutir favorablemente en las adaptaciones producidas por el entrenamiento de fuerza a altas velocidades, ya que se ha indicado que las mejoras de fuerza son específicas de la velocidad a la que se entrena (Behm & Sale, 1993; Cronin, McNair, & Marshall, 2002). Sin embargo, los estudios que han analizado el efecto de un programa de entrenamiento comparando una configuración tradicional (sin descanso entre repeticiones) con entrenamientos en los que se añade un tiempo de recuperación entre repeticiones han

mostrado resultados contradictorios. En este sentido, podemos encontrar estudios que muestran mayores ganancias en la fuerza y la potencia muscular para el grupo que realizó cada serie de entrenamiento añadiendo un tiempo de recuperación entre repeticiones (Oliver et al., 2013), otros que indican que no añadir descanso entre repeticiones resulta en mayor incremento de fuerza (Lawton, Cronin, Drinkwater, Lindsell, & Pyne, 2004), y otros que no encuentran diferencias en el porcentaje de mejora de la fuerza y la velocidad entre ambas configuraciones del entrenamiento (Hansen, Cronin, Pickering, & Newton, 2011). Esto se puede deber a que en estos estudios, además del tiempo de recuperación entre repeticiones, se manipulaba de manera simultánea varias variables de entrenamiento como el tiempo de recuperación entre series, el número de series y el número de repeticiones por serie. Por tanto, aun se desconoce si añadir un tiempo de recuperación entre repeticiones es más beneficioso para la mejora de la fuerza, la hipertrofia y el rendimiento deportivo que realizar las series de entrenamiento sin tiempo de descanso entre repeticiones.

#### **3.1.4. Tipo de ejercicio**

Existen distintos criterios para clasificar el tipo de ejercicio (Bird, et al., 2005), pero posiblemente los más importantes sean la *especificidad*, *el número de articulaciones involucradas en el movimiento* y *la forma de realizar el ejercicio*.

En cuanto a la *especificidad*, los ejercicios pueden ser clasificados en tres bloques diferentes:

- **Ejercicios *no* específicos pero útiles:** Hoy en día existe una extrema tendencia (y a veces infundada) hacia la especificidad, llegándose a despreciar casi por completo todos aquellos ejercicios llamados *tradicionales* (p. ej. sentadilla, press de banca, ejercicios olímpicos, etc.), o todo aquello que no se realice en el propio *lugar de competición* (p. ej. pista de baloncesto, campo de fútbol, pista de atletismo, etc.). Sin embargo, la mejora del rendimiento en todos los deportes exige la mejora de ciertas cualidades físicas que la realización del propio gesto de competición no puede proporcionar por sí solo. Por tanto, es necesario implementar ejercicios de entrenamiento que permitan un mayor desarrollo de esas cualidades. Este es el caso de ejercicios como la sentadilla o el press de banca, los cuales no son específicos

pero tienen transferencia hacia otros gestos deportivos como el salto vertical, el sprint, el cambio de dirección, la velocidad de golpeo o de lanzamiento (Hermassi, Chelly, Tabka, Shephard, & Chamari, 2011; Mora-Custodio, Rodríguez-Rosell, Pareja-Blanco, Yáñez-García, & González-Badillo, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2014; Pareja-Blanco, et al., 2016b; Rodríguez-Rosell et al., 2016; Saez de Villarreal, Requena, Izquierdo, & González-Badillo, 2013; Torres-Torrelo, et al., 2016; Wisloff, Castagna, Helgerud, Jones, & Hoff, 2004), acciones que pueden permitir una mejora del rendimiento en determinadas especialidades deportivas.

- **Ejercicios específicos con carga adicional:** Aquí se pueden englobar todos aquellos ejercicios en los que se utiliza una técnica, patrón de movimiento y velocidades de ejecución muy próximas a la de los gestos que se realizan durante la propia competición, pero llevados a cabo con una carga adicional. Esta carga adicional debe asegurar precisamente que el gesto de competición no se desvirtúe y que los tiempos de aplicación de la fuerza durante la realización del entrenamiento no se alejen demasiado de los propios gestos de competición. Ejemplos de este tipo de ejercicios pueden ser las carreras con arrastres, los saltos con carga o los lanzamientos con implementos más pesados a los usados en la propia competición.
- **Propio gesto de competición:** Es importante que los programas de entrenamiento incluyan ejercicios que sean los propios de competición para que los deportistas puedan desarrollar no solo su condición física, sino también las habilidades técnico-tácticas y estratégicas en situaciones propias de competición. Sin embargo, el uso exclusivo de este tipo de ejercicios puede limitar el desarrollo de algunas cualidades físicas importantes para el rendimiento.

En cuanto al número de articulaciones envueltas en el movimiento, los ejercicios se pueden clasificar en *monoarticulares* o *multiarticulares*. Ambos tipos de ejercicio han mostrado ser efectivos para la mejora de la fuerza de grupos musculares concretos (Kraemer & Ratamess, 2004; Ratamess et al., 2009). Los ejercicios monoarticulares focalizan el estrés sobre una sola articulación y un grupo muscular concreto y se piensa que el uso de este tipo de ejercicios posee un menor riesgo de lesión debido a que requieren una menor habilidad técnica para su ejecución (Kraemer & Ratamess, 2004). Por el contrario, los ejercicios multiarticulares requieren de una activación

neuromuscular más compleja y una mayor coordinación. Por estos motivos y por la mayor cantidad de masa muscular envuelta, el uso de este tipo de ejercicios produce una mayor mejora de la fuerza que los ejercicios monoarticulares (Garhammer, 1991; Kraemer & Ratamess, 2004; Ratamess, et al., 2009).

Por último, los ejercicios pueden ser realizados en *máquinas* o en *peso libre*. Ambos tipos de ejercicio han sido usados para la evaluación y el entrenamiento de la fuerza muscular. Los ejercicios realizados en *máquina* son catalogados como seguros y fáciles de aprender, ya que mantienen el patrón de movimiento durante todo el rango de movimiento (Cotterman, Darby, & Skelly, 2005; Kraemer & Ratamess, 2004; Ratamess, et al., 2009). Los ejercicios en *peso libre* permiten el movimiento en múltiples planos y requieren una mayor activación por parte de los músculos sinergistas para la estabilización del movimiento. Dado que ambos tipos de ejercicios han proporcionado mejoras similares de la fuerza, el uso de ejercicios en *máquina* o *peso libre* va a depender de los requerimientos del test, de la condición física inicial de los participantes, del grado de familiarización con el movimiento específico y del objetivo del entrenamiento (Cotterman, et al., 2005; Kraemer & Ratamess, 2004; Ratamess, et al., 2009).

Por tanto, según se deduce de los resultados de los estudios, la elección de los ejercicios debería basarse en sus particularidades mecánicas (potencia y/o velocidad máxima que permiten desarrollar, velocidad de la RM conseguida con ellos, si son de empuje o de tracción, etc.). En general, se propone que se debería dar prioridad a los ejercicios globales que implican a varias articulaciones y grupos musculares frente a los localizados.

### **3.1.5. Orden de los ejercicios**

El orden de los ejercicios se refiere a la secuencia de ejercicios de fuerza realizados durante una sesión de entrenamiento (Bird, et al., 2005) y es una variable importante en cuanto que influye significativamente en el rendimiento de los ejercicios, la producción de fuerza, la fatiga acumulada y las adaptaciones al entrenamiento de fuerza (Bird, et al., 2005; Kraemer & Ratamess, 2004; Ratamess, et al., 2009; Spiering, et al., 2008). Generalmente se recomienda realizar primero aquellos ejercicios que envuelven

mayores grupos musculares, seguidos por ejercicios monoarticulares o que involucran una menor masa muscular para obtener una mayor ganancia de fuerza (Kraemer & Ratamess, 2004; Ratamess, et al., 2009; Sforzo & Touey, 1996). Sin embargo, existen algunos estudios en los que no se han mostrados diferencias en las ganancias de fuerza después de un programas de entrenamiento con distinto orden de ejercicios (Assumpcao, Tibana, Viana, Willardson, & Prestes, 2013), e indican que estas recomendaciones se pueden modificar en función de los objetivos del entrenamiento (Dias, de Salles, Novaes, Costa, & Simao, 2010; Kraemer & Ratamess, 2004). De este modo, Gentil et al. (2007) recomendaron que, si el objetivo principal de un programa de entrenamiento es aumentar el rendimiento deportivo, los ejercicios que tienen más transferencia sobre el rendimiento o los propios ejercicios de competición deberían realizarse al principio de la sesión, cuando menor grado de fatiga acumulada existe y mejor asimilación se puede producir por parte del sistema neuromuscular.

### **3.1.6. Velocidad de ejecución**

La velocidad de ejecución es posiblemente la variable menos estudiadas y comprendida de todas aquellas que determinan la carga de entrenamiento (Bird, et al., 2005; Pareja-Blanco, et al., 2014; Pereira & Gomes, 2003). La velocidad de ejecución depende de (1) la magnitud de la carga levantada (% 1RM), y 2) la voluntariedad del sujeto para levantar la carga (Crewther, Cronin, & Keogh, 2005; Ingebrigtsen, Holtermann, & Roeleveld, 2009; Kraemer & Ratamess, 2004) y es un elemento determinante de la intensidad debido a que influye directamente sobre las exigencias neuromusculares (Desmedt & Godaux, 1977, 1978; Schilling, Falvo, & Chiu, 2008), la respuesta mecánica y metabólica (Buitrago, Wirtz, Yue, Kleinoder, & Mester, 2012; González-Badillo, et al., 2014; Kraemer & Ratamess, 2004; Pareja-Blanco, et al., 2014) y, como consecuencia, sobre los efectos del entrenamiento (González-Badillo, et al., 2014; Pareja-Blanco, et al., 2014; Pereira & Gomes, 2003). De hecho, existe una gran cantidad de literatura que indica que los incrementos en la fuerza muscular son específicos de la velocidad de entrenamiento, es decir, los mayores incrementos de la fuerza se producen a o cerca de la velocidad de entrenamiento (Cronin, et al., 2002; Kanehisa & Miyashita, 1983; Pereira & Gomes, 2003). Por tanto, en base al principio de *especificidad* del entrenamiento, todos los ejercicios o acciones musculares encaminadas a la mejora del



rendimiento deportivo deberían realizarse siempre a la máxima velocidad posible (Behm & Sale, 1993; Cronin, et al., 2002; González-Badillo & Ribas, 2002; Pereira & Gomes, 2003). Esta sería la manera más adecuada de obtener el máximo beneficio de cada una de las cargas de entrenamiento.

Existen pocos estudios que hayan comparado la respuesta mecánica y fisiológica al desplazar una misma carga de entrenamiento a distintas velocidades de manera voluntaria (Buitrago, et al., 2012; González-Badillo, et al., 2014; Mazzetti, Douglass, Yocum, & Harber, 2007; Pareja-Blanco, et al., 2014; Schilling, et al., 2008). Estos estudios han mostrado que ejecutar cada repetición a la máxima velocidad posible durante la fase concéntrica del movimiento, independientemente de la carga levantada, produce un mayor gasto energético (Mazzetti, et al., 2007), un mayor consumo de oxígeno (Buitrago, et al., 2012), una mayor producción de lactato (Buitrago, et al., 2012; González-Badillo, et al., 2014; Pareja-Blanco, et al., 2014), mayores picos de fuerza y aceleración (Schilling, et al., 2008) y un incremento en la activación de unidades motoras de alto umbral de reclutamiento (Bigland & Lippold, 1954; Grimby & Hannerz, 1977). Por tanto, en contra de lo que han indicado algunos autores (Hutchins, 1992; Westcott et al., 2001), realizar las repeticiones voluntariamente de forma lenta no aumenta la intensidad de la contracción muscular o la intensidad del entrenamiento. El único argumento para soportar esta afirmación es que las contracciones lentas aumentan el tiempo bajo tensión (la duración de cada repetición) (Buitrago, et al., 2012; Mazzetti, et al., 2007) y esto puede causar un aumento de la sensación de fatiga muscular y de aumento de la musculatura como resultado de un incremento en el flujo sanguíneo muscular (Mazzetti, et al., 2007). Sin embargo, las exigencias neuromusculares son mayores cuando se ejecutan las repeticiones a la máxima velocidad posible en comparación con ejecutarlas a una velocidad menor de manera voluntaria.

La mayoría de los estudios en los que se ha analizado el efecto de la voluntariedad en el levantamiento de la carga en ejercicios isoinerciales sobre las ganancias de fuerza no han mostrado diferencias entre ejecutar las repeticiones rápidas o lentas (Fielding et al., 2002; Ingebrigtsen, et al., 2009; Morrissey, Harman, Frykman, & Han, 1998; Munn, Herbert, Hancock, & Gandevia, 2005; Pereira & Gomes, 2003; Schoenfeld, Ogborn, & Krieger, 2015; Westcott, et al., 2001; Young & Bilby, 1993). Sin embargo, las diferencias en la intensidad y el volumen utilizado para cada una de las condiciones de entrenamiento (*rápido* vs. *lento*) nos impiden conocer el efecto real de la variable

*velocidad de ejecución* sobre el rendimiento físico. Además, en muchos de los estudios antes mencionados se usaron protocolos de entrenamiento en los que se realizaba el máximo número de repeticiones posibles en cada serie de entrenamiento (fallo muscular) para ambas condiciones de entrenamiento (Fielding, et al., 2002; Morrissey, et al., 1998; Pereira & Gomes, 2007; Young & Bilby, 1993). Cuando se ejecuta cada repetición a la máxima velocidad posible, a medida que aumenta el número de repeticiones realizado durante una serie en un ejercicio isoinercial, la velocidad disminuye progresivamente como consecuencia de la fatiga acumulada en las repeticiones anteriores (Enoka & Duchateau, 2008; Izquierdo, et al., 2006a; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), de tal manera que si el ejercicio no cesa, la última repetición se realizará a una velocidad muy próxima a la velocidad de la repetición máxima para ese ejercicio (Duffey & Challis, 2007; González-Badillo & Ribas, 2002; Izquierdo, et al., 2006a; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Esto significa que, aunque inicialmente las velocidades en ambos protocolos de entrenamiento fueran diferentes, al llegar hasta el fallo muscular, las diferencias en las velocidades medias de cada serie de entrenamiento entre ejecutar *rápido* o *lento* disminuyen considerablemente. Esta podría ser la razón por la que no se encontraron diferencias en las ganancias de fuerza entre ambas condiciones de entrenamiento.

Para conocer el efecto de una variable concreta, en este caso la velocidad de ejecución, es importante que el resto de variables (intensidad, series, repeticiones por serie, tiempo de recuperación entre series) se mantengan constantes en los distintos protocolos de entrenamiento propuestos. En este sentido, solo conocemos dos estudios (González-Badillo, et al., 2014; Pareja-Blanco, et al., 2014) en los que se haya comparado el efecto de dos protocolos de entrenamiento de fuerza que difieren únicamente en la velocidad de ejecución sobre la fuerza muscular y el rendimiento en pruebas de velocidad y salto. En estos estudios se controló y se cuantificó por primera vez la velocidad de ejecución de cada repetición durante cada sesión de entrenamiento, lo cual permitió ajustar las cargas de entrenamiento de manera individualizada y conocer las diferencias reales en cuanto a velocidad media por sesión entre ambos grupos. Después de seis semanas de entrenamiento (3 sesiones por semana) el grupo que ejecutó cada repetición a la máxima velocidad posible obtuvo mayores ganancias de fuerza en los ejercicios de sentadilla y press de banca, y mayores mejoras del rendimiento en el salto vertical y el sprint en 20 m que el grupo que ejecutó cada repetición al 50% de dicha velocidad máxima

(González-Badillo, et al., 2014; Pareja-Blanco, et al., 2014). Estos resultados confirman que la velocidad de movimiento debe ser considerada como un componente fundamental de la intensidad durante el ejercicio de fuerza, dado que para una magnitud de carga determinada (% 1RM), la velocidad de levantamiento determina el efecto agudo y a largo plazo del entrenamiento (González-Badillo, et al., 2014; Pareja-Blanco, et al., 2014).

## **3.2. Fatiga neuromuscular**

### **3.2.1. Definición**

El uso repetido e intenso de la musculatura ocasiona un descenso reversible del rendimiento físico conocido como fatiga neuromuscular (Allen, Lamb, & Westerblad, 2008). La fatiga es un fenómeno completo y multifactorial cuya etiología no ha sido totalmente comprendida, a pesar de haber sido foco de numerosas investigaciones durante más de 100 años (Allen, et al., 2008; Cairns, Knicker, Thompson, & Sjogaard, 2005; Di Giulio, Daniele, & Tipton, 2006; Enoka et al., 2011; Enoka & Duchateau, 2008; Fitts, 2008). Existen multitud de definiciones de fatiga (Allen, et al., 2008; Enoka & Duchateau, 2008; Halson, 2014), las cuales a veces dependen del modelo experimental empleado y/o las condiciones bajo las cuales se produce dicha fatiga (Halson, 2014). A pesar de esa amplia variedad de definiciones, la mayoría de los investigadores identifican la fatiga muscular con *la incapacidad momentánea para mantener un nivel de fuerza esperado o requerido* durante la realización de una actividad física (Allen, et al., 2008; Asmussen, 1979; Edwards, 1983; Enoka & Duchateau, 2008; Fitts, 2008; Sogaard, Gandevia, Todd, Petersen, & Taylor, 2006). De acuerdo con esta definición, la fatiga muscular no se puede identificar con el punto en el que se produce el fallo muscular o el momento en el que el músculo comienza a estar exhausto (Enoka & Duchateau, 2008; Sogaard, et al., 2006). Más que eso, la fatiga muscular es un continuo que se desarrolla progresivamente tan pronto como se inicia una actividad muscular (Enoka & Duchateau, 2008), y que se acentúa a medida que aumenta la duración de la misma (Cairns, et al., 2005).

### 3.2.2. Factores asociados con la fatiga muscular

Como hemos comentado anteriormente, la fatiga se caracteriza por una pérdida de fuerza muscular, lo cual puede ser explicado por un descenso en la producción de tensión por parte de los puentes cruzados y/o por un descenso en el número de puentes cruzados activos (Allen, et al., 2008; Enoka & Duchateau, 2008; Fitts, 2008). Además, otros aspectos del rendimiento muscular como la velocidad de acortamiento y el tiempo de relajación también sufren cambios durante la fatiga (Allen, et al., 2008). Identificar estos aspectos puede resultar relativamente sencillo, siempre y cuando se disponga del material necesario para medir las variables adecuadas. Sin embargo, esto no parece suficiente para explicar el problema.

Si nos preguntamos por qué se produce la fatiga, la respuesta también es relativamente sencilla: porque uno o varios de los procesos fisiológicos responsables de la producción de fuerza ha empeorado (Enoka & Duchateau, 2008). La complejidad reside en conocer cuál o cuáles son los puntos en los que se está produciendo un deterioro funcional. Durante una contracción voluntaria, los músculos son activados por vías complejas que comienzan en el córtex cerebral y continúan con la excitación de neuronas motoras en la médula espinal. Los axones de dichas neuronas conducen los potenciales de acción hasta la unión neuromuscular, donde, tras la despolarización, comienza una cascada de eventos que concluye con la puesta en marcha de la maquinaria contráctil mediante el establecimiento de puentes cruzados entre los filamentos de actina y miosina (Allen, et al., 2008; Fitts, 2008; Kandel, 2001). Por simplificar, todos los procesos que ocurren de la médula espinal hacia arriba se definen como *Factores Centrales*, mientras que los procesos que se producen en los nervios periféricos, las uniones neuromusculares y los propios músculos se denominan *Factores Periféricos* (Allen, et al., 2008; Fitts, 2008). A lo largo de todo este camino, se han identificado numerosos lugares donde puede producirse la fatiga (Allen, et al., 2008; Fitts, 2008). El problema está en que, el lugar en el que se produce el empeoramiento va a depender del tipo concreto de protocolo de ejercicio que se realice, lo cual incluye: el tipo de activación (voluntaria o eléctrica), el tipo de contracción (concéntrica, excéntrica o isométrica), forma de generar la contracción (continua o intermitente), duración, frecuencia, intensidad del ejercicio y tipo de musculatura implicada (Barry & Enoka, 2007; Cairns, et al., 2005; Enoka &

Duchateau, 2008; Halson, 2014; Sahlin, 1992). Esto es lo que se conoce como *dependencia de la tarea* de la fatiga muscular (Asmussen, 1979; Bigland-Ritchie, Rice, Garland, & Walsh, 1995; Enoka & Duchateau, 2008). De acuerdo con este principio, no existe solo una causa para explicar la fatiga muscular y el mecanismo dominante es específico de aquellos procesos que son estresados durante el ejercicio de fatiga (Cairns, et al., 2005; Enoka & Duchateau, 2008). Por tanto, los mecanismos involucrados en la fatiga, y su importancia cuantitativa como factores limitantes del rendimiento, dependerán del tipo concreto de protocolo de ejercicio llevado a cabo (Barry & Enoka, 2007; Cairns, et al., 2005). Este concepto es análogo al principio de *especificidad* que caracteriza las adaptaciones neuromusculares producidas por varias semanas de entrenamiento (Enoka & Duchateau, 2008; Kraemer & Ratamess, 2004; Ratamess, et al., 2009).

Aunque se ha descrito que todo proceso de fatiga tiene un componente *central* y otro *periférico* cuya aparición e importancia en el proceso de fatiga va a depender de las características del ejercicio realizado (Babault, Desbrosses, Fabre, Michaut, & Pousson, 2006; Bigland-Ritchie, et al., 1995; Enoka & Duchateau, 2008; MacIntosh & Rassier, 2002), la mayoría de los estudios que han analizado los factores asociados con la fatiga muscular han examinado los cambios metabólicos relacionados con el ciclo excitación-relajación de las fibras musculares (*fatiga periférica*) (Allen, et al., 2008; Cairns & Lindinger, 2008; Fitts, 2008; MacIntosh & Rassier, 2002; McCully, Authier, Olive, & Clark, 2002; Westerblad, Allen, & Lannergren, 2002), quizás debido a que analizar la *fatiga central* es una problemática más difícil de abordar técnicamente. A pesar de ello, en los últimos años ha habido un avance en la identificación de algunos factores neurales responsables de la fatiga muscular (Enoka, et al., 2011; Levenez, Garland, Klass, & Duchateau, 2008).

#### *Cambios metabólicos en la musculatura con la fatiga*

Una de las características principales del músculo es que puede consumir adenosin trifosfato (ATP) a una velocidad superior a la que éste puede ser regenerado. Durante un ejercicio de alta intensidad, a pesar de que se produce una gran demanda energética, la concentración de ATP se mantiene prácticamente constante (solo se reduce marginalmente), sin embargo, se produce un incremento en las concentraciones de

adenosín difosfato (ADP), fosfato inorgánico (Pi), creatina (Cr) y protones ( $H^+$ ), así como un descenso en las concentraciones de fosfocreatina (PCr) y glucógeno muscular (Allen, et al., 2008; Allen & Trajanovska, 2012; Cady, Jones, Lynn, & Newham, 1989; Fitts, 2008; Gorostiaga et al., 2012a; Gorostiaga et al., 2010). Cuando aumenta la concentración de ADP, esta es hidrolizada en mayor medida por la enzima adenilato kinasa hacia adenosín monofosfato (AMP), la cual es rápidamente desaminada a ionosín monofosfato (IMP). Este proceso ayuda a reducir el aumento de la concentración de ADP, con la consecuente disminución de la energía libre para la hidrólisis del ATP (Allen, et al., 2008). Los cambios en las concentraciones de ATP, ADP, AMP, PCr y Pi ocurren dentro de unos márgenes relativamente estereotipados, lo cual ha sido documentado en varios estudios (Allen, et al., 2008; Cady, et al., 1989; Lanza, Wigmore, Befroy, & Kent-Braun, 2006). Sin embargo, el grado de acidosis observado durante ejercicios de alta intensidad es más variable debido a que la velocidad y el grado de activación de la glicólisis anaeróbica dependen del tipo de fibra y de la naturaleza de la actividad realizada. Además, las fibras musculares contienen una gran cantidad de transportadores de lactato, el cual reduce cualquier acumulación intracelular de lactato y protones (Allen & Trajanovska, 2012).

Durante mucho tiempo, el descenso del pH intracelular (debido al incremento de la concentración de  $H^+$ ) asociado con la acumulación de ácido láctico y la disminución de la concentración de potasio se ha considerado como el mayor causante de la fatiga muscular (Allen, et al., 2008; Allen & Trajanovska, 2012; Cairns & Lindinger, 2008; Westerblad & Allen, 2002; Westerblad, et al., 2002). Esta hipótesis se basa en las correlaciones observadas entre el incremento de la concentración sanguínea de lactato e  $H^+$  y la pérdida de fuerza a medida que incrementa la fatiga (Spriet, Soderlund, Bergstrom, & Hultman, 1987a, 1987b). Además, también se ha encontrado que la acumulación de lactato y la disminución de la fuerza ocurren de manera más lenta (1) después de realizar un entrenamiento, y (2) en las fibras *tipo I* (fibras de contracción más lenta) en comparación con las fibras *tipo II* (fibras de contracción más rápida). Estas correlaciones reforzaban el papel de la acidosis como factor clave en la pérdida de fuerza muscular. Sin embargo, el rol del descenso del pH como *causante* principal de la fatiga está cambiando en los últimos años debido al incremento de publicaciones que indican que una reducción del pH tiene un escaso efecto sobre la contracción muscular, sobre todo a temperaturas fisiológicas (Allen, et al., 2008; Bruton, Lannergren, &

Westerblad, 1998; Cairns, 2006; Cairns & Lindinger, 2008; Westerblad, Bruton, & Lannergren, 1997). De este modo, otros estudios y revisiones parecen indicar que, más que ser la causa de la fatiga, la acidosis tiene un efecto beneficioso sobre la mejora del rendimiento muscular ya que permite una mayor liberación de oxígeno desde la hemoglobina a los músculos activos (*efecto Bohr*), estimula la ventilación, mejora el flujo sanguíneo muscular y mejora el feedback aferente hacia el sistema nervioso central para incrementar la impulsión cardiovascular (Cairns, 2006; Juel, 1997; Street, Bangsbo, & Juel, 2001; Westerblad, et al., 2002).

Como hemos comentado anteriormente, las concentraciones de Cr y Pi aumentan durante la actividad muscular como consecuencia de la ruptura de PCr para mantener el suministro de ATP. Mientras que el aumento de la concentración de Cr parece tener poco efecto sobre la contracción muscular (Eijnde, Lebacqz, Ramaekers, & Hespel, 2004; Murphy, Stephenson, & Lamb, 2004), el incremento en la concentración de Pi ha sido vinculado con múltiples efectos negativos sobre la función contráctil del músculo esquelético (Allen & Trajanovska, 2012; Place, Yamada, Bruton, & Westerblad, 2010; Westerblad, et al., 2002; Westerblad, Bruton, & Katz, 2010). De hecho, el incremento de la concentración de Pi en el mioplasma podría disminuir la producción de fuerza durante la fatiga por una acción directa sobre la función de los puentes cruzados (Allen & Trajanovska, 2012; Caremani, Dantzig, Goldman, Lombardi, & Linari, 2008; Fitts, 2008; Westerblad, et al., 2002). Además de afectar al número de puentes cruzados activos y la tensión generado por estos (Caremani, et al., 2008), el incremento de Pi afecta directamente a los canales de calcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) del retículo sarcoplásmico (RS) haciendo que se reduzca la salida de  $\text{Ca}^{2+}$  iónico al medio, y como consecuencia la fuerza muscular (Allen & Trajanovska, 2012; Place, et al., 2010). Del mismo modo, también se ha comprobado que el incremento de la concentración de Pi hace que disminuya la sensibilidad por el  $\text{Ca}^{2+}$  de los miofilamentos musculares, contribuyendo así a la reducción de producción de fuerza (Allen, et al., 2008; Allen & Trajanovska, 2012; Millar & Homsher, 1990; Westerblad, et al., 2010). Por tanto, aunque existen muchos factores que pueden estar modulando los cambios en la capacidad de producir fuerza que se produce con la fatiga, parece que el incremento en la concentración de Pi está involucrado en muchos de los procesos que explican el descenso de la fuerza muscular (Allen & Trajanovska, 2012; Westerblad, et al., 2002).

### *Cambios neurales con la fatiga*

Una de las estrategias utilizadas para identificar los factores que determinan el descenso de la activación voluntaria de la musculatura durante la fatiga ha sido analizar la respuesta de las vías aferentes que van desde el córtex motor a la médula espinal a través de diferentes técnicas como el reflejo de Hoffman (RH) y los potenciales motores evocados cervicomedularmente (PMEC) (Enoka, et al., 2011; Klass, Levenez, Enoka, & Duchateau, 2008; Levenez, et al., 2008; Ruotsalainen, Ahtiainen, Kidgell, & Avela, 2014). Durante la fatiga, el tamaño del RH desciende a pesar de producirse un incremento en la amplitud de la electromiografía de superficie (EMGs) (Duchateau, Balestra, Carpentier, & Hainaut, 2002; Enoka, et al., 2011; Klass, et al., 2008). Esta reducción representa probablemente un descenso en la transmisión de la señal eléctrica a lo largo de la vía desde el lugar en el que se ha producido el potencial de acción en los axones Ia hasta las neuronas motoras, lo cual indica un descenso en la excitabilidad de las neuronas (Duchateau, et al., 2002; Enoka, et al., 2011). Asociado con esto, en algunos estudios (Dimitrov et al., 2006; González-Izal et al., 2010a; González-Izal et al., 2010b; Gorostiaga et al., 2012b) se ha mostrado un descenso en la frecuencia mediana ( $F_{med}$ ) y el incremento en algunos parámetros espectrales como el índice de Dimitrov (ID) (Dimitrov, et al., 2006) a medida que incrementa el número de repeticiones realizadas durante un ejercicio dinámico de alta intensidad. Se ha sugerido que los cambios en estas variables con la fatiga pueden deberse, al menos en parte, a un descenso en la velocidad de conducción de la fibra muscular asociado con (1) un descenso del pH intramuscular (Brody, Pollock, Roy, De Luca, & Celli, 1991), (2) un aumento de la duración de los potenciales de acción y (3) un descenso en la tasa de disparo de las unidades motoras fatigadas (Bigland-Ritchie, Donovan, & Roussos, 1981; Bigland-Ritchie, Johansson, Lippold, & Woods, 1983). Por otro lado, a través de los PMECs se analizan las vías motoras que están por debajo del córtex motor (Gandevia, Petersen, Butler, & Taylor, 1999) y sus cambios solamente indican una modulación de la excitabilidad de la neurona motora (Enoka, et al., 2011; Martin, Gandevia, & Taylor, 2006). Varios estudios indican que durante una contracción isométrica submáxima (25-50% de la fuerza isométrica máxima) mantenida durante el máximo tiempo posible, la amplitud de los PMEC incrementa inicialmente y luego se mantiene constante durante el tiempo que dura la contracción, mientras que la amplitud del RH desciende



progresivamente (Duchateau, et al., 2002; Levenez, et al., 2008). Estas respuestas divergentes del RH y de los PMEC sugieren que el descenso en la amplitud del RH no se debe a una reducción de la excitabilidad de la neurona motora, sino que representa la modulación del feedback aferente del conjunto de motoneuronas (Enoka, et al., 2011; Levenez, et al., 2008). Por tanto, el descenso en la activación muscular voluntaria parece debido a un descenso en la señal de entrada sináptica aferente más que a una reducción en la velocidad de conducción descendente. Además, la respuesta producida también indica que se produce una depresión gradual de la excitabilidad espinal durante la fatiga (Enoka, et al., 2011). Por tanto, tomado de manera conjunta, los cambios en el RH y en los PMEC parecen indicar que la activación voluntaria de la musculatura puede ser empeorada durante las contracciones repetidas y que la depresión de la actividad en la médula espinal es el principal factor de dicho déficit (Enoka, et al., 2011).

### **3.2.3. Formas de medir la fatiga muscular**

Existe una gran problemática en relación a (1) el modelo utilizado, (2) el tipo de contracción, (3) las variables analizadas, y (4) el momento en el que medir la fatiga muscular. En la mayoría de las ocasiones, el principal problema de la medición de la fatiga radica en la utilización de métodos o modelos que se alejan mucho de la propia práctica deportiva (Cairns, et al., 2005). Así, por ejemplo, muchos de los estudios en los que se han analizado los mecanismos asociados a la fatiga neuromuscular han sido realizados tanto en fibras aisladas *in vitro* e *in situ* (de Haan, Jones, & Sargeant, 1989; de Haan, Lodder, & Sargeant, 1989; Edman & Mattiazzi, 1981; Munkvik, Lunde, & Sejersted, 2009; Rehn et al., 2009), como en músculos estimulados eléctricamente (Kesar & Binder-Macleod, 2006; Klass, Guissard, & Duchateau, 2004; Maluf & Enoka, 2005; Maluf, Shinohara, Stephenson, & Enoka, 2005; Rudroff, Staudenmann, & Enoka, 2008). Aunque este tipo de experimentos de laboratorio son, sin duda, necesarios para poder identificar los diferentes mecanismos fisiológicos subyacentes a la aparición de la fatiga, su principal inconveniente es la falta de aplicabilidad directa a la mayoría de las acciones musculares que se realizan en la práctica del entrenamiento deportivo, que, en general, son acciones repetidas de tipo dinámico con participación de múltiples articulaciones y grupos musculares.

Por otro lado, habitualmente se han utilizado dos tipos de protocolos para cuantificar el desarrollo de fatiga muscular: (1) interrumpir el ejercicio que se está realizando con una breve contracción máxima (voluntaria o evocada eléctricamente) para estimar el descenso en la capacidad de producir fuerza (Bigland-Ritchie, Furbush, & Woods, 1986; Hunter, Critchlow, Shin, & Enoka, 2004; Sogaard, et al., 2006); (2) medir el descenso en la fuerza máxima o la potencia medida inmediatamente después de terminar el ejercicio de fatiga (Babault, et al., 2006; Levenez, Kotzamanidis, Carpentier, & Duchateau, 2005; McNeil, Murray, & Rice, 2006). Aunque estos dos métodos se pueden considerar válidos para medir el grado de fatiga inducido por el ejercicio de fuerza, analizar los factores asociados con la fatiga y comprender el estímulo de entrenamiento, ambos necesitan de una medición previa y posterior al ejercicio de fatiga para poder cuantificar el grado de pérdida de fuerza generado. Por tanto, no sabríamos cuál es el grado de fatiga inducido por el ejercicio hasta que realizáramos dichas mediciones. Esto nos impediría, por ejemplo, diseñar el entrenamiento en función de un grado de fatiga determinado, ya que para ello tendríamos que interrumpir continuamente la serie de entrenamiento para saber si hemos alcanzado dicho grado de fatiga. Dado que la fatiga se considera un *continuum* más que un punto concreto de fallo muscular (Cairns, et al., 2005; Enoka & Duchateau, 2008), una aproximación más adecuada para conocer en *tiempo real* el grado de fatiga inducido durante el ejercicio de fuerza sería analizar la pérdida de fuerza y/o velocidad (y como consecuencia, de potencia muscular) a medida que incrementa el tiempo o el número de repeticiones realizadas dentro de la serie.

En cuanto al tipo de activación o contracción muscular realizada para cuantificar el grado de fatiga muscular, la mayoría de las investigaciones, independientemente del protocolo utilizado para inducir fatiga, se han llevado a cabo usando mediciones isométricas (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Ahtiainen, Pakarinen, Kraemer, & Hakkinen, 2003b; Chapman, Newton, Sacco, & Nosaka, 2006; Hamada, Sale, MacDougall, & Tarnopolsky, 2003; Masuda, Masuda, Sadoyama, Inaki, & Katsuta, 1999). Este tipo de test determina la capacidad que tiene el músculo de generar fuerza bajo unas condiciones relativamente estables y constantes (Cairns, et al., 2005). Sin embargo, las contracciones de tipo isométrico son relativamente raras *in vivo*, donde la activación voluntaria de la musculatura resulta, normalmente, en movimiento. En otros trabajos se han realizado evaluaciones de la fatiga mediante contracciones dinámicas concéntricas,

aunque casi siempre de manera isocinética (Byrne & Eston, 2002a, 2002b; Byrne, Eston, & Edwards, 2001; Ferri, Narici, Grassi, & Pousson, 2006), y solo en algunos estudios se utilizaron contracciones dinámicas isoinerciales (Gorostiaga, et al., 2012a; Izquierdo et al., 2009; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). En este sentido, la evaluación a través de contracciones dinámicas isoinerciales es importante porque, a diferencia de las evaluaciones de tipo isométrico o isocinético, que normalmente presentan una baja relación con el rendimiento neuromuscular en acciones dinámicas (A. J. Murphy & Wilson, 1996a, 1996b; Wilson, Lyttle, Ostrowski, & Murphy, 1995), la evaluación isoinercial de la fuerza muscular parece reflejar mejor los gestos y movimientos de entrenamiento y competición propios de la mayoría de los deportes, en los cuales se producen acciones repetidas de aceleración y desaceleración (Cronin, McNair, & Marshall, 2003). Además, la evaluación isoinercial parece ser un procedimiento más sensible para analizar la fatiga muscular (Cairns, et al., 2005) y para realizar un seguimiento longitudinal de los cambios que se producen en los niveles de fuerza como consecuencia del entrenamiento (Abernethy & Jurimae, 1996). Por otro lado, la medición a través, únicamente, de un tipo de contracción concreta nos proporciona una visión parcial de los efectos de la fatiga sobre el rendimiento neuromuscular, puesto que cada test indica la capacidad que tiene un músculo de contraerse y producir fuerza en unas determinadas condiciones, pero no en otras. Esto quiere decir que la fatiga puede afectar de distinta manera según sea el test a través de la cual lo midamos (Cairns, et al., 2005). Por tanto, aunque la elección del método más apropiado para la cuantificación de la fatiga debe ser hecha en relación al problema de investigación (Cairns, et al., 2005), para obtener una mayor información de la manifestación y de los factores involucrados en la fatiga, sería necesario cuantificarla a través de distintos tipos de contracción.

Otro aspecto importante a la hora de analizar la fatiga muscular es la variable utilizada para cuantificarla, ya que los mecanismos fisiológicos subyacentes a los cambios inducidos por la fatiga en la producción de fuerza son diferentes a los que afectan a la velocidad de acortamiento o la potencia muscular (Allen, et al., 2008; Griffin & Cafarelli, 2005; Holtermann, Roeleveld, Vereijken, & Ettema, 2007). Como hemos comentado anteriormente, en la mayoría de los estudios se utilizaron contracciones isométricas para cuantificar la fatiga (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Ahtiainen, et al., 2003b; Chapman, et al., 2006; Hamada, et al., 2003; Masuda, et al., 1999), y en muchos

de estos trabajos solo se analizó el descenso en el pico de fuerza máxima, mientras que otra variable, igual o más importante que esta, como es la producción de fuerza por unidad de tiempo (RFD) ha recibido una menor atención científica (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Marshall, Robbins, Wrightson, & Siegler, 2012; Molina & Denadai, 2012). Si para ver la fatiga que una actividad produce en la musculatura solo medimos la fuerza máxima que un sujeto es capaz de generar, estamos desestimando la función que puede tener la fatiga a la hora de realizar esfuerzos de corta duración (Aagaard, Simonsen, Andersen, Magnusson, & Dyhre-Poulsen, 2002). Al igual que la RFD, la reducción en la velocidad de contracción ha sido menos estudiada que la pérdida de fuerza isométrica, probablemente porque es una cuestión más difícil de abordar técnicamente. El análisis de los cambios en la velocidad de acortamiento merece ser objeto de estudio en el ámbito del rendimiento deportivo, porque la gran mayoría de los gestos y acciones deportivas han de realizarse a una alta o máxima velocidad. Además, la velocidad es un criterio de referencia muy utilizado en la valoración de la condición física del deportista (González-Badillo, 1991; González-Badillo & Ribas, 2002; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2014). A pesar de las importantes implicaciones prácticas de la velocidad de ejecución en el rendimiento deportivo y del avance en los medios tecnológicos para poder obtener una medición *precisa e instantánea* de la velocidad, pocos estudios han utilizado ésta variable como medio para cuantificar el grado de fatiga (González-Badillo, et al., 2014; González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, et al., 2014; Pareja-Blanco, et al., 2016a; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011; Smilios, Hakkinen, & Tokmakidis, 2010).

#### **3.2.4. La fatiga como elemento necesario para la adaptación**

A pesar de los aspectos *negativos* asociados con la fatiga muscular (pérdida momentánea de fuerza, velocidad y potencia muscular), la presencia de fatiga es un elemento necesario y fundamental para producir adaptaciones neuromusculares (Rooney, Herbert, & Balnave, 1994; Toigo & Boutellier, 2006). De hecho, el grado de fatiga inducido durante el entrenamiento de fuerza juega un papel importante en la amplitud y la duración de la respuesta metabólica y hormonal, y en las vías de señalización intramuscular, los cuales son factores que determinan las adaptaciones neuromusculares (Schoenfeld, 2013b; Spiering, et al., 2008). Tal es la importancia de

este factor que, desde un punto de vista reduccionista, los entrenadores son, o deberían ser, *suministradores* de fatiga. Es decir, cuando los entrenadores o preparadores físicos diseñan un programa de entrenamiento, lo que se debería programar es el *grado de fatiga* que se quiere inducir en el deportista, y en base a eso diseñar las tareas o ejercicios a realizar durante el entrenamiento. Sin embargo, en la práctica deportiva normalmente primero se programan los ejercicios y después, solo en algunos casos, se cuantifica la fatiga generada. Ahora bien, aunque sepamos que es importante programar en base a la fatiga que queremos inducir, la dificultad radica en encontrar cuál es el grado de fatiga adecuado en cada momento para cada deportista.

Durante una actividad física, la musculatura experimenta un grado de estrés específico que puede desafiar y provocar una alteración de la homeostasis interna y, en ocasiones, de los componentes estructurales del músculo (Hoppeler, 2016). Por tanto, atendiendo a los principios elementales de adaptación del ser humano al medio externo, para que se produzca una mejora en el rendimiento de cualquier cualidad física es necesario que el organismo se enfrente sistemáticamente a nuevos estímulos. Debido a la enorme plasticidad que caracteriza al sistema neuromuscular humano, las adaptaciones producidas en el organismo estarán determinadas por las características de los estímulos proporcionados durante el entrenamiento (Coffey & Hawley, 2007; Hoppeler, 2016). En este sentido, aunque existen numerosos trabajos que han investigado los efectos de diferentes programas de entrenamiento sobre la mejora de la fuerza y la potencia, nuestro conocimiento y nuestra comprensión sobre los estímulos que producen dichas adaptaciones aún no han sido aclarados suficientemente (Crewther, et al., 2005). Parece que durante el ejercicio de fuerza, los estímulos de entrenamiento están determinados principalmente por el estrés mecánico (Hoppeler, 2016; McDonagh & Davies, 1984b), el cual está asociado con las variables cinéticas y cinemáticas producidas durante el ejercicio (fuerza, velocidad, duración de la contracción, potencia, trabajo muscular, etc.), y por supuesto, con la interacción con otros factores hormonales y metabólicos (Spiering, et al., 2008; Toigo & Boutellier, 2006). En un intento por conocer mejor el estrés mecánico inducido durante el ejercicio de fuerza, se han realizado gran cantidad de investigaciones centradas en conocer el significado cinético y cinemático de realizar una sola repetición. Se han estudiado, por ejemplo, las diferencias en la producción de fuerza, potencia y velocidad según el porcentaje de carga (% 1RM) utilizado en el ejercicio (Cormie, McCaulley, Triplett, & McBride, 2007; Kawamori et al., 2005;

Kawamori et al., 2006; Kilduff et al., 2007; Murphy, Wilson, & Pryor, 1994), el tipo de contracción (isométrica, dinámica concéntrica o excéntrica) (Murphy, et al., 1994), la forma de realizar dicha repetición (controlado o a la máxima velocidad o "balístico") (Cronin, McNair, & Marshall, 2001; Cronin, et al., 2003; Newton, Kraemer, Häkkinen, Humphries, & Murphy, 1996), y la utilización o no de rebote (CEA) durante la ejecución (Cronin, et al., 2003; Newton, et al., 1996; Stone et al., 2003). Sin embargo, estos estudios tienen fundamentalmente dos problemas. El primero de ellos es que no existe un protocolo estandarizado para la realización de cada uno de los ejercicios (intensidad, número de cargas y repeticiones con cada una de ellas, instrucción para la ejecución, etc.) ni tampoco para la obtención (instrumentos de medida), recolección (cálculo de la fuerza o potencia) y análisis de los datos. Estos factores podrían explicar, por ejemplo, el amplio rango de cargas reportado por las diferentes investigaciones para optimizar la potencia muscular (Crewther, et al., 2005). Por otra parte, el conocimiento sobre cuál es la respuesta ante una única repetición no soluciona por sí solo la problemática planteada sobre cuáles son los estímulos que determinan las adaptaciones al entrenamiento de fuerza. Dado que las sesiones de entrenamiento normalmente están compuestas por varias series de distintos ejercicios, con un número determinado de repeticiones cada una de ellas, los resultados encontrados en esas investigaciones en cuanto al estímulo mecánico que supone realizar una sola repetición no nos permiten inferir el efecto final del entrenamiento, ya que este conocimiento tiene una importancia práctica muy limitada en términos de comprensión del estímulo global que supone una sesión completa de entrenamiento (Crewther, et al., 2005; Duffey & Challis, 2007). Por tanto, es importante realizar estudios en los que se analicen los cambios que se producen en la fuerza, la velocidad y la potencia muscular durante cada serie de entrenamiento como consecuencia de la fatiga (Crewther, et al., 2005), ya que la cinética y la cinemática asociada con el entrenamiento constituye un elemento clave de los estímulos que determinan las adaptaciones neuromusculares (Crewther, et al., 2005; Hoppeler, 2016; Spiering, et al., 2008; Toigo & Boutellier, 2006).

Sabemos, por tanto, que la fatiga es un elemento necesario para que se produzcan adaptaciones en el sistema neuromuscular. Sin embargo, existen pocas evidencias científicas en relación a cuál es el grado de fatiga óptimo para la mejora del rendimiento. Basándonos en esos estudios, parece que existe una relación no lineal entre el volumen de entrenamiento y el aumento del rendimiento (González-Badillo, et al.,

2005; González-Badillo, et al., 2006; Kuipers, 1996), de tal modo que una vez alcanzado un umbral de volumen determinado, un incremento en dicho volumen de entrenamiento no produce mayores ganancias e incluso podría provocar un descenso del rendimiento (Fry & Kraemer, 1997; González-Badillo, et al., 2005; González-Badillo, et al., 2006; Winett & Carpinelli, 2001). Los resultados de estos estudios contradicen la idea generalmente aceptada sobre el entrenamiento de fuerza que indica que "*cuanto más, mejor*" (the more, the better) o "*no hay mejora sin dolor*" (no pain, no gain), ya que se observado que se pueden obtener ganancias en la fuerza muscular sin necesidad de realizar el máximo volumen posible. A pesar de estos avances, es difícil precisar qué volúmenes de entrenamiento serían más beneficiosos ya que estos van a depender, probablemente, de las características de cada deportista y de las necesidades de fuerza de cada deporte. Por tanto, es necesario llevar a cabo estudios en los que se analicen de manera profunda las bases fisiológicas del entrenamiento a través del efecto agudo y a largo plazo de diferentes protocolos de entrenamiento en los que se manipule el volumen de entrenamiento para poder hacer una mejor aproximación al *volumen óptimo* de entrenamiento.

### **3.3. Respuesta mecánica y fisiológica aguda ante sesiones de entrenamiento de fuerza realizadas con la misma intensidad relativa pero con diferentes volúmenes**

A pesar de la gran cantidad de estudios publicados en relación al análisis de la fatiga (mecánica, metabólica, neuromuscular y neuroendocrina) aguda producida por diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Ahtiainen, et al., 2003b; Ahtiainen, Pakarinen, Kraemer, & Hakkinen, 2004; Hakkinen, 1995; Kraemer, 1988; Kraemer et al., 1991; Kraemer et al., 1999; Kraemer, et al., 1990; Kraemer, et al., 1987; Ruotsalainen, et al., 2014; Walker, Davis, Avela, & Hakkinen, 2012; Walker, Taipale, Nyman, Kraemer, & Hakkinen, 2011), resulta sorprendente que solo un escaso número de investigaciones (González-Badillo, et al., 2016; Gorostiaga, et al., 2012a; Gorostiaga et al., 2014; Gorostiaga, et al., 2010; Pareja-Blanco, et al., 2016a; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) se hayan centrado en analizar el efecto de manipular el número de repeticiones realizadas en función del máximo número de repeticiones que se podrían realizar [también llamado *carácter del esfuerzo* (González-

Badillo & Ribas, 2002; González-Badillo & Gorostiaga, 1995)] ante una intensidad relativa (% 1RM) determinada. La falta de atención científica a este apartado se debe probablemente a la creencia de que el entrenamiento de fuerza tiene que ser hecho siempre realizando el máximo número de repeticiones posibles en cada serie de entrenamiento, es decir, hasta el fallo muscular (Drinkwater, et al., 2005; Kraemer & Ratamess, 2004; Willardson, et al., 2008). A pesar de que este tipo de entrenamiento es una práctica habitual en cualquier ámbito en el que se aplique un entrenamiento de fuerza incluido gimnasios, programas de rehabilitación, entrenamiento con niños o personas adultas, investigaciones y entrenamiento con deportistas, cada vez hay un mayor número de estudios que indican que:

1. El entrenamiento hasta el fallo muscular provoca un aumento acentuado de distintas hormonas (cortisol, testosterona, GH, prolactina) y marcadores sanguíneos (lactato, CK) relacionados con el daño muscular (Kraemer, 1988; Kraemer, et al., 1993; Kraemer, et al., 1991; Kraemer, et al., 1990). Además, los entrenamientos realizando el máximo número de repeticiones por serie causan un deterioro transitorio de la función neuromuscular (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Ahtiainen, et al., 2003b; González-Izal, et al., 2010a; Hakkinen, 1995) y un incremento significativo de las concentraciones de amonio (Gorostiaga, et al., 2014; Izquierdo et al., 2011), lo cual es un indicativo de que se está produciendo una degradación de los nucleótidos de purina. Este factor hace que el tiempo de recuperación necesario para este tipo de esfuerzos aumente considerablemente (Gorostiaga, et al., 2012a; Gorostiaga, et al., 2014; Gorostiaga, et al., 2012b; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011).
2. El uso repetido de este tipo de esfuerzos no produce mayores mejoras sobre la fuerza muscular que hacer entrenamientos con un menor número de repeticiones por serie, e incluso puede tener efectos perjudiciales sobre la capacidad de aplicar fuerza en cortos periodos de tiempo (Andersen, et al., 2010; González-Badillo, et al., 2005; González-Badillo, et al., 2006; Pareja-Blanco, et al., 2016b).

Una vez que conocemos los efectos adversos que se producen a corto, medio y largo plazo sobre la función neuromuscular tras la realización de entrenamientos hasta el fallo, parece necesario realizar estudios que nos ayuden a avanzar en el conocimiento sobre el *volumen óptimo* de entrenamiento. Un primer paso es conocer el efecto mecánico, metabólico y hormonal agudo que tiene la realización de entrenamientos de



fuerza con distintos número de repeticiones ante la misma intensidad relativa, ya que las adaptaciones neuromusculares al entrenamiento van a depender en gran medida del grado de estrés producido por los estímulos de entrenamiento proporcionados (Spiering, et al., 2008; Toigo & Boutellier, 2006).

Aunque previamente se habían publicado algunos trabajos comparando el efecto de entrenar hasta el fallo vs. no fallo sobre las ganancias de fuerza (Drinkwater, et al., 2005; Folland, Irish, Roberts, Tarr, & Jones, 2002; Izquierdo-Gabarren et al., 2010; Izquierdo, et al., 2006b), para nuestro conocimiento, el primer estudio en el que se analiza la respuesta mecánica y el estrés metabólico agudo producido por diferentes protocolos de entrenamiento en los que se manipula el número de repeticiones realizadas en función del máximo número que podrían ser realizadas con una carga determinada es el realizado por Sánchez-Medina & González-Badillo (2011). En este estudio (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) se examinaron los cambios en (1) la pérdida de velocidad dentro de la serie, (2) la pérdida de velocidad ante la carga que los sujetos podían desplazar a  $\sim 1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $C_{1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}}$ ) antes de la realización del esfuerzo, (3) la altura de salto vertical (solo en los esfuerzos realizado en el ejercicio de sentadilla), y (4) las concentraciones de lactato y amonio, después de 15 protocolos de entrenamiento de fuerza que diferían en el número de repeticiones realizado (RR) en relación con las que se podían realizar (PR) [RR(PR): 6(12), 8(12), 10(12), 12(12), 6(10), 8(10), 10(10), 4(8), 6(8), 8(8), 3(6), 4(6), 6(6), 2(4) y 4(4)]. Como era de esperar, la pérdida de velocidad dentro de la serie aumentó progresivamente a medida que el número de repeticiones realizadas en la serie se aproximaba al máximo (fallo muscular). Sin embargo, debido al control y a la monitorización de la velocidad de ejecución de cada repetición durante todas las sesiones de entrenamiento, este fue el primer estudio en el que se proporcionaron valores de pérdida de velocidad ante diferentes esfuerzos de fuerza, y se comprobó que dicha pérdida de velocidad dentro de la serie fue mayor para el ejercicio de press de banca que el de sentadilla. Al igual que la pérdida de velocidad dentro de la serie, la pérdida de velocidad con  $C_{1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}}$  (y la altura de salto en el grupo que realizó los esfuerzos en el ejercicio de sentadilla) también aumentó progresivamente con el incremento del número de repeticiones realizadas dentro de la serie en función del máximo número que se podía realizar, y fue mayor para el ejercicio de press de banca en comparación con el ejercicio de sentadilla (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). En cuanto al estrés metabólico, se observó que la concentración

sanguínea de lactato aumentó de manera lineal con la pérdida de velocidad dentro de la serie en ambos ejercicios ( $r = 0.97$  y  $r = 0.95$ , para sentadilla completa y press de banca, respectivamente). Sin embargo, un hallazgo único de este estudio fue que la respuesta del amonio, a diferencia del lactato, mostró una relación curvilínea con la pérdida de velocidad dentro de la serie, de tal manera que los valores de amonio en sangre solo incrementan por encima de los valores de reposo cuando el número de repeticiones realizado dentro de la serie fue al menos de dos más de la mitad del máximo número de repeticiones posible que se podían realizar dentro de la serie (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Este comportamiento fue similar tanto para el ejercicio de sentadilla como el de press de banca y parece indicar que existe un "*umbral de nivel de esfuerzo*" (determinado por la pérdida de velocidad dentro de la serie: ~30% para el ejercicio de sentadilla y ~35% para el ejercicio de press de banca) el cual debe ser excedido o superado para que se produzca una respuesta en la concentración sanguínea de amonio. Además, las altas correlaciones encontradas en este estudio entre las medidas mecánicas (pérdida de velocidad y pérdida de altura de salto) y metabólicas (concentraciones sanguíneas de lactato y amonio) de la fatiga muscular soportan la validez de usar la pérdida de velocidad dentro de la serie como una variable para cuantificar objetivamente la fatiga neuromuscular durante el entrenamiento de fuerza (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). En base a este importante hallazgo, los autores de este estudio sugieren que en vez de prescribir una determinada carga (peso, en kg) y un número de repeticiones concreto a realizar en cada serie, el entrenamiento de fuerza debería prescribirse en función de dos variables (González-Badillo, Marques, & Sánchez-Medina, 2011; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011): 1) la velocidad de la primera repetición, la cual está estrechamente relacionada con la intensidad de la carga (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2014); y 2) la máxima pérdida de velocidad permitida en cada serie de entrenamiento. Este nuevo paradigma, denominado como entrenamiento de fuerza basado en la velocidad, constituye un nuevo horizonte de conocimiento en las Ciencias del Deporte y representa la base fundamental sobre la que se sustenta la presente Tesis doctoral.

Estudios posteriores se han centrado en analizar el efecto de la manipulación del número de repeticiones realizado dentro de la serie sobre la potencia muscular y diferentes sustratos y metabolitos relacionados con el metabolismo energético (Gorostiaga, et al., 2012a; Gorostiaga, et al., 2014). En estos estudios se compararon

dos esfuerzos: 10(10) vs 5(10), pero, a diferencia del estudio realizado por Sánchez-Medina & González-Badillo (2011), se igualó el número de repeticiones totales realizadas en ambos protocolos de entrenamiento, de tal manera que el grupo que realizaba cada serie hasta el fallo muscular [10(10)] llevó a cabo 5 series, mientras que el grupo que realizó la mitad de las repeticiones posibles en cada serie [5(10)] ejecutó 10 series de entrenamiento. A pesar de esta diferencia, los resultados de estos estudios (Gorostiaga, et al., 2012a; Gorostiaga, et al., 2014) están en la misma línea que los mostrados previamente por Sánchez-Medina & González-Badillo (2011). En este sentido, el protocolo 5(10) permitió mantener prácticamente constante la potencia media y máxima producida durante las 50 repeticiones realizadas, mientras que el protocolo 10(10) indujo un descenso significativo del ~28% desde la repetición 6 a la 50 (Gorostiaga, et al., 2012a; Gorostiaga, et al., 2014). Estos descensos en la potencia muscular estaban fuertemente relacionados con los cambios en las concentraciones sanguíneas y musculares de lactato, amonio, ATP y PCr (Gorostiaga, et al., 2012a; Gorostiaga, et al., 2014; Gorostiaga, et al., 2012b). Además, realizar el máximo número de repeticiones posibles en cada serie de entrenamiento produjo un desequilibrio severo en el metabolismo energético caracterizado por: (1) una depleción casi completa de los depósitos de PCr (85%), un descenso significativo de ATP muscular (21%) y del pool total de nucleótidos de adenina (20%), y (2) un aumento de la concentración de IMP ( $0.01 \pm 0.00$  -  $0.87 \pm 0.69$  mmol·kg<sup>-1</sup>), lactato muscular ( $1.70 \pm 1.18$  -  $25.01 \pm 8.09$  mmol·kg<sup>-1</sup>) y ácido úrico (19%). Por el contrario, realizar la mitad de las repeticiones posibles en cada serie solo produjo un descenso de la PCr muscular (15%) y un ligero aumento de la concentración de lactato muscular ( $2.02 \pm 1.05$  -  $5.80 \pm 4.62$  mmol·kg<sup>-1</sup>), mientras que el resto de metabolitos se mantuvieron sin cambios después de la última serie (Gorostiaga, et al., 2012a). Por tanto, los resultados de estos estudios sugieren que no superar el 50% de las repeticiones posibles en cada serie de entrenamiento ante una carga determinada permite mantener la homeostasis celular y generar un grado de fatiga significativamente menor que realizar el máximo número de repeticiones posibles en cada serie, lo que supondría una recuperación post-esfuerzo más rápida.

Como complemento a estos trabajos iniciales, recientemente se han llevado a cabo una serie de estudios centrados en analizar el efecto agudo y a corto plazo (hasta 48 horas post-esfuerzo) de 10 protocolos de entrenamiento de fuerza en los que se realizaban el máximo número de repeticiones posibles y la mitad de las repeticiones posibles ante

distintas cargas [6(12), 12(12), 5(10), 10(10), 4(8), 8(8), 3(6), 6(6), 2(4) y 4(4)] sobre la respuesta mecánica, hormonal y de variabilidad de frecuencia cardíaca (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016a). En estos trabajos se volvió a comprobar que los protocolos de entrenamiento en los que se realizan el máximo número de repeticiones posibles en cada serie de entrenamiento producen mayor (1) pérdida de velocidad dentro de la serie y (2) pérdida de velocidad con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  (y la altura de salto en el grupo que realizó los esfuerzos en el ejercicio de sentadilla) post-esfuerzo que realizar la mitad de las repeticiones posibles, especialmente en aquellos protocolos en los que se realizaban un alto número de repeticiones máximas [12(12), 10(10) y 8(8)]. Además, varios de estos esfuerzos realizados hasta el fallo produjeron una disminución del rendimiento (pérdida de altura de salto y velocidad con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$ ) que se mantuvo hasta 24-48h después del ejercicio.

La respuesta bioquímica estuvo caracterizada por un aumento significativo de las concentraciones post-esfuerzo (5 min después de terminar el protocolo de entrenamiento) de diferentes hormonas como la prolactina, GH, IGF-1, cortisol y testosterona tras la realización de aquellos esfuerzos con altos volúmenes y máximo número de repeticiones por serie [12(12), 10(10) y 8(8)] (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016a), mientras que en los esfuerzos en los que se realizaban la mitad de las repeticiones posibles, las concentraciones hormonales se mantuvieron prácticamente sin cambios. La concentración sanguínea de CK aumentó significativamente para todos los esfuerzos, aunque en mayor medida para los esfuerzos en los que se realizaba un mayor número de repeticiones por serie. Del mismo modo, todos los esfuerzos produjeron una disminución de la variabilidad de la frecuencia cardíaca durante e inmediatamente después del ejercicio (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016a). Además, en estos estudios se encontraron altas correlaciones entre los cambios en las variables mecánicas, la respuesta hormonal, el daño muscular y la variabilidad de la frecuencia cardíaca. Generalmente, las relaciones entre estas variables fueron mayores entre los valores obtenidos inmediatamente después del esfuerzo, y disminuyeron progresivamente a medida que aumentaba el tiempo de recuperación (6 h, 24 h y 48 h post-esfuerzo). En base a estos resultados, y en línea con los estudios antes mencionados (Gorostiaga, et al., 2012a; Gorostiaga, et al., 2014; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), los autores de estos estudios (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-

Blanco, et al., 2016a) recomiendan no realizar esfuerzos que superen la mitad de las repeticiones posibles (~20% y ~30% de pérdida de velocidad dentro de la serie para los ejercicios de sentadilla y press de banca, respectivamente).

Por último, como hemos descrito anteriormente en este y otros apartados, la fatiga muscular está muy relacionada con los cambios metabólicos de la musculatura, pero también están estrechamente vinculados con los cambios neurales (Enoka, et al., 2011; Enoka & Duchateau, 2008; MacIntosh & Rassier, 2002). Aunque el número de estudios relacionados con la fatiga neural es considerablemente menor a aquellos en los que se han analizado la respuesta mecánica y hormonal, existen algunos trabajos en los que se han examinado los cambios en distintas variables relacionadas con la actividad eléctrica muscular durante o después de distintos protocolos de entrenamiento de fuerza en los que se realizaba el máximo número de repeticiones por serie (Akima & Saito, 2013; Babault, et al., 2006; González-Izal, et al., 2010a; González-Izal, et al., 2010b; Gorostiaga, et al., 2012b; Izquierdo, et al., 2011), o incluso se comparan los cambios en la EMG muscular entre realizar el máximo número de repeticiones y realizar repeticiones *forzadas* o con ayuda (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Ahtiainen, et al., 2003b). En algunos de estos estudios (González-Izal, et al., 2010a; Gorostiaga, et al., 2012b) se ha comprobado cómo el promedio de la tensión media (MAV) y el ID aumentan, mientras que la  $F_{med}$  tiende a disminuir a medida que incrementa el número de repeticiones realizadas dentro de una serie hasta el fallo muscular [10(10)]. Además, los cambios en la potencia desarrollada durante cada repetición (cuantificado como el porcentaje de cambio con respecto a los valores obtenidos en las dos primeras repeticiones) mostraron relación con los cambios en ID ( $r = -0.59$ ;  $p < 0.01$ ),  $F_{med}$  ( $r = 0.50$ ;  $p < 0.01$ ), la frecuencia media instantánea ( $r = 0.57$ ;  $p < 0.01$ ) y MAV ( $r = -0.39$ ;  $p < 0.01$ ) (González-Izal, et al., 2010a). A pesar de estos hallazgos, no conocemos ningún estudio en el que se analicen los cambios en la EMGs después de distintos protocolos de entrenamiento de fuerza que difieran en el número de repeticiones realizado en función del máximo número de repeticiones que puede ser realizado con una carga determinada.

En resumen, los resultados de todos los estudios antes mencionados (González-Badillo, et al., 2016; Gorostiaga, et al., 2012a; Gorostiaga, et al., 2014; Gorostiaga, et al., 2012b; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016a; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) parecen indicar que el carácter del esfuerzo es una variable muy importante a considerar para la programación del entrenamiento de fuerza, ya que tanto

el estímulo mecánico como el estrés metabólico, hormonal y neural difieren considerablemente dependiendo del número de repeticiones realizadas en función de las que se podrían realizar dentro de cada serie de entrenamiento. Aunque estos hallazgos suponen un gran avance en el conocimiento de los estímulos mecánicos y la respuestas fisiológicas que modula las adaptaciones neuromusculares, el nuevo paradigma creado en torno al entrenamiento de fuerza basado en la velocidad requiere de estudios que analicen la respuesta neuromuscular y el estrés metabólico ante esfuerzos determinados por la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad dentro de cada serie de entrenamiento. Precisamente, este es uno de los objetivos principales que se persigue en la presente Tesis Doctoral, el cual será desarrollado en el **Estudio II**.

### **3.4. Relación entre el volumen de entrenamiento y la mejora del rendimiento**

El objetivo principal de cualquier tipo de entrenamiento, incluido el entrenamiento de fuerza, es obtener un rendimiento físico y deportivo cada vez mayor (Kuipers, 1996). Para elevar nuestras cualidades físicas hasta su límite superior, es necesario llevar a cabo un programa de entrenamiento adecuado en el que exista un control y cuantificación de todas las variables relacionadas con la carga de entrenamiento y que éstas estén ajustadas a las características de los deportistas y las necesidades físicas del deporte. Aunque esto pueda ser relativamente sencillo de entender, estos aspectos relacionados con el entrenamiento constituyen el motivo fundamental de la problemática que existe permanentemente en cualquier tipo de entrenamiento (González-Badillo & Ribas, 2002; González Badillo, 1992), la cual se resume esencialmente en dos preguntas: (1) ¿Cuál es el nivel de carga óptimo?; (2) ¿Cuál es la mínima magnitud de carga que es positiva para la mejora del rendimiento?

Dentro del campo del entrenamiento deportivo existe la creencia de que para alcanzar la máxima expresión posible de las cualidades físicas, es imprescindible realizar una gran cantidad de trabajo. Por este motivo, los deportistas se encuentran continuamente (y probablemente de manera innecesaria) en un peligroso equilibrio entre el entrenamiento y el sobreentrenamiento (Kuipers, 1996). A pesar de que existen pocos estudios científicos que permitan conocer cuál es la carga óptima de entrenamiento para mejorar

el rendimiento, parece que aplicar la máxima carga posible en cada serie o cada sesión de entrenamiento no produce los mayores beneficios (Kuipers, 1996). De hecho, en base a los pocos datos que existen en la literatura, parece que hay una relación no lineal entre el volumen de entrenamiento y el incremento del rendimiento, de tal manera que si se excede un determinado *umbral* de volumen de entrenamiento, el rendimiento no solo no mejora sino que, incluso, puede tener un efecto negativo (Costill et al., 1991; Kuipers, 1996; González-Badillo, et al., 2005; González-Badillo, et al., 2006).

En relación con el entrenamiento de fuerza también existe una idea, generalmente extendida y aceptada, la cual indica que realizar el máximo volumen de entrenamiento produce mayores beneficios sobre el rendimiento neuromuscular (Davies, Orr, Halaki, & Hackett, 2016). Por este motivo, todos los estudios y todas las recomendaciones sobre el entrenamiento de fuerza están basadas en la realización siempre del máximo número de repeticiones posibles en cada serie de entrenamiento, es decir, hasta el fallo muscular (Bird, et al., 2005; Kraemer & Ratamess, 2004; Phillips, 2009; Ratamess, et al., 2009), y ni siquiera se contempla la posibilidad de manipular el número de repeticiones a realizar en función de las repeticiones que pueden ser realizadas con una carga determinada. Sin embargo, un número cada vez mayor de investigaciones (Folland, et al., 2002; González-Badillo, et al., 2005; González-Badillo, et al., 2006; Izquierdo-Gabarren, et al., 2010; Izquierdo, et al., 2006b; Pareja-Blanco, et al., 2016b; Sampson & Groeller, 2016; Sanborn et al., 2000) y revisiones (Carpinelli, Otto, & Winett, 2004; Davies, et al., 2016; Willardson, Norton, & Wilson, 2010) parecen indicar que realizar el máximo volumen de entrenamiento podría no ser un estímulo necesario para producir mayores ganancias de fuerza en comparación con menores volúmenes de entrenamiento, y que, por tanto, es innecesario usar series hasta el fallo para maximizar la fuerza y la hipertrofia muscular (Davies, et al., 2016; Sampson & Groeller, 2016). En este sentido, al igual que ocurre con la carga total de entrenamiento (Kuipers, 1996), los diferentes estudios que han analizado el efecto de modificar el volumen de entrenamiento sobre las ganancias de fuerza (González-Badillo, et al., 2005; González-Badillo, et al., 2006) sugieren que puede existir una relación curvilínea entre el volumen durante el entrenamiento de fuerza y las ganancias de fuerza. Esta relación indica, al menos, dos cosas: i) debe existir un volumen mínimo (*umbral* de volumen) para cada intensidad o rango de intensidades que produzca mejoras, y que todavía no ha sido determinado; ii) a partir de ese *umbral* mínimo, un incremento progresivo del volumen

vendrá acompañado por un aumento en las ganancias de fuerza, pero solo hasta un cierto límite, a partir del cual, un aumento de dicho volumen de entrenamiento no producirá mayores beneficios sobre la fuerza. Incluso, si se excede un determinado valor de volumen de entrenamiento, es posible que el rendimiento pueda disminuir (González-Badillo, et al., 2005; González-Badillo, et al., 2006; González-Badillo & Ribas, 2002).

### 3.5. Justificación del uso de entrenamientos hasta el fallo muscular

El principal motivo empleado por los diferentes estudios y *position stand* sobre entrenamiento de fuerza (Ahtiainen, et al., 2003b; Delorme, 1945; Drinkwater, et al., 2005; Kraemer & Fleck, 1988; Kraemer & Ratamess, 2004; Ratamess, et al., 2009; Willardson, et al., 2008) para indicar que las series de entrenamiento deben ser realizadas hasta el fallo muscular es que este tipo de entrenamiento permite el reclutamiento (y fatiga) de un mayor número de unidades motoras (Davies, et al., 2016; Drinkwater, et al., 2005; Rooney, et al., 1994; Sale, 1987; Willardson, 2007), lo cual es un factor importante para maximizar las ganancias de fuerza (Del Balso & Cafarelli, 2007; Moritani & deVries, 1979; Sale, 1988, 1992). Sobre la base del *Principio del Tamaño* de las motoneuronas descrito por Henneman et al. (1957, 1965), se ha descrito que durante una serie realizada hasta el fallo muscular, se reclutan en primer lugar las unidades motoras de menor umbral de activación (fibras tipo I y IIA) (Rooney, et al., 1994; Sale, 1987). A medida que aumenta el número de repeticiones realizadas dentro de la serie, estas unidades motoras de bajo umbral se van fatigando, lo que resulta en la activación de unidades motoras de mayor umbral (predominantemente fibras tipo IIX) para intentar mantener el nivel de fuerza requerido (Davies, et al., 2016; Rooney, et al., 1994; Sale, 1987). Una vez que todas las unidades motoras disponibles han sido reclutadas y fatigadas, se produce una incapacidad (momentánea y reversible) de seguir moviendo un determinado peso, lo cual es conocido como fallo muscular. Por este motivo, se ha postulado que el entrenamiento realizando el máximo número de repeticiones posibles en cada serie es más beneficioso para obtener mayores ganancias de fuerza muscular. Sin embargo, esto aún no ha sido confirmado empíricamente (Davies, et al., 2016). De hecho, en algunos estudios (Gorostiaga, et al., 2012b;



Sundstrup et al., 2012) se ha encontrado que el máximo nivel de activación (lo cual puede estar relacionado con el número de unidades motoras activas) de los músculos envueltos en el movimiento se produce en torno a 3-5 repeticiones antes de alcanzar el fallo muscular. Además de esto, los estudios que recomiendan realizar el máximo número de repeticiones posibles en cada serie de entrenamiento para maximizar el reclutamiento de las unidades motoras no han tenido en cuenta una variable que influye directamente en el nivel de activación muscular como es la velocidad de ejecución (Bigland & Lippold, 1954; Desmedt & Godaux, 1977, 1978; Grimby & Hannerz, 1977). El *principio del tamaño* (Henneman, 1957; Henneman, et al., 1965) indica que el reclutamiento de unidades motoras depende del esfuerzo o intensidad demandada, de tal manera que a bajas intensidades se requerirá la activación de unidades motoras de bajo umbral de reclutamiento, mientras que a medida que incrementa la intensidad se necesitará de la activación de unidades motoras de mayor umbral de reclutamiento. Esto no quiere decir que, ante un esfuerzo determinado, se produzca siempre y obligatoriamente una activación progresiva de unidades motoras desde aquellas de menor umbral hasta aquellas de mayor umbral de reclutamiento. Como se desprende de la propia relación entre la intensidad y el tamaño de las motoneuronas, esto va a depender directamente de la intensidad del ejercicio. En este sentido, como hemos descrito anteriormente en este apartado, la velocidad de ejecución es un elemento determinante de la intensidad durante el ejercicio de fuerza debido a que influye directamente sobre las exigencias neuromusculares (Desmedt & Godaux, 1977, 1978; Schilling, et al., 2008), la respuesta mecánica y el estrés metabólico (Buitrago, et al., 2012; González-Badillo, et al., 2014; Kraemer & Ratamess, 2004; Pareja-Blanco, et al., 2014). Así, ejecutar cada repetición a la máxima velocidad de manera voluntaria produciría una activación simultánea de todas las unidades motoras, principalmente de aquellas de alto umbral de reclutamiento las cuales están asociadas a fibras de contracción más rápidas (fibras tipo IIX), a través de un descenso en el umbral de reclutamiento y un aumento de la tasa de descarga de las unidades motoras (Desmedt & Godaux, 1977; Grimby & Hannerz, 1977). Por tanto, estos resultados ponen en cuestión la necesidad de aplicar entrenamientos hasta el fallo para obtener un mayor reclutamiento de unidades motoras.

Otro de los argumentos utilizados para recomendar que el entrenamiento de fuerza debe ser realizado siempre haciendo el máximo número de repeticiones posibles en cada serie

es que este tipo de entrenamiento, en comparación con no llegar hasta el fallo, produce un mayor daño muscular y un mayor incremento de hormonas anabólicas, lo cual se ha asociado tradicionalmente con los cambios en la fuerza y la hipertrofia muscular (Ahtiainen, Pakarinen, Alen, Kraemer, & Hakkinen, 2003a; Kraemer & Ratamess, 2004; Ronnestad, Nygaard, & Raastad, 2011). Sin embargo, estudios más recientes (Schoenfeld, 2013a; West et al., 2010; West et al., 2009; Wilkinson, Tarnopolsky, Grant, Correia, & Phillips, 2006) parecen indicar que no se requiere un incremento del nivel de hormonas anabólicas (testosterona, cortisol, GH, etc.) para que se produzca un aumento significativo de la fuerza y la hipertrofia muscular. Por tanto, parece que la justificación de usar entrenamientos hasta el fallo muscular con el fin de maximizar el reclutamiento de unidades motoras y el estrés hormonal, y aumentar así la hipertrofia muscular, es cuestionable en estos momentos.

Los hallazgos antes mencionados en relación con (1) la importancia de la velocidad de ejecución voluntaria en el reclutamiento de unidades motoras de alto umbral (Desmedt & Godaux, 1977; Grimby & Hannerz, 1977; González-Badillo, et al., 2014; Pareja-Blanco, et al., 2014), y (2) que no se requiere un incremento del nivel de hormonas anabólicas para que se produzca un aumento significativo de la fuerza y la hipertrofia muscular (Schoenfeld, 2013a; West et al., 2010; West et al., 2009) suponen un gran avance en el campo del entrenamiento de fuerza, puesto que vienen a aportar evidencias científicas que justifican que no es necesario realizar el máximo número de repeticiones en cada serie de entrenamiento para obtener las mayores ganancias de fuerza. Sin embargo, los resultados de estos estudios por sí solo no nos permiten solucionar la problemática relacionada con el *volumen óptimo* de entrenamiento. Para dar respuesta a esta pregunta, sería necesario analizar el efecto de entrenar con distintos volúmenes de entrenamiento ante las mismas cargas relativas. Precisamente, este será uno de los objetivos fundamentales de la presente Tesis Doctoral, el cual será tratado en su **Estudio III**.

### 3.6. Efectos del entrenamiento de fuerza con distintos volúmenes

Desde las primeras publicaciones relacionadas con los beneficios del entrenamiento de fuerza (Delorme, 1945; Houtz, Parrish, & Hellebrandt, 1946), en las que ya se hablaba, se definía y se programaba en base a la carga de 10 repeticiones máximas (10RM), han surgido infinidad de estudios en los que se han manipulado y combinado multitud de *variables de entrenamiento* con el fin de analizar su influencia sobre las adaptaciones neuromusculares. Desde esos primeros estudios (Delorme, 1945; Houtz, et al., 1946), entrenar realizando el máximo número de repeticiones en cada serie de entrenamiento se ha mantenido como una ley universal casi hasta nuestros días sin que se haya cuestionado su utilidad (Sampson & Groeller, 2016). No ha sido hasta casi 55 años después cuando han empezado a aparecer las primeras publicaciones científicas en las que se compara entrenar hasta el fallo con no entrenar hasta el fallo muscular (Davies, et al., 2016; Drinkwater, et al., 2005; González-Badillo, et al., 2005; González-Badillo, et al., 2006; Izquierdo-Gabarren, et al., 2010; Izquierdo, et al., 2006b; Pareja-Blanco, et al., 2016b; Sampson & Groeller, 2016; Sanborn, et al., 2000; Willardson, et al., 2008). Aunque la mayoría de estos estudios parecen indicar que entrenar hasta el fallo no es el método más eficiente para la mejora de la fuerza, el número de investigaciones es aún escaso, y por tanto, se necesitan más estudios para confirmar que no entrenar hasta el fallo es igual o más efectivo para inducir mejoras en la fuerza (Davies, et al., 2016).

### **3.6.1. Efectos del entrenamiento hasta el fallo vs. no fallo**

Según una reciente revisión publicada por Davies et al. (2016), solo existen 8 estudios (Drinkwater, et al., 2005; Folland, et al., 2002; Izquierdo-Gabarren, et al., 2010; Izquierdo, et al., 2006b; Kramer et al., 1997; Rooney, et al., 1994; Sampson & Groeller, 2016; Sanborn, et al., 2000) en los que se ha comparado el efecto de realizar entrenamientos de fuerza (intervenciones de más de tres sesiones de entrenamiento) hasta el fallo con no llegar hasta el fallo muscular sobre la mejora de la fuerza muscular. Sin embargo, en varios de estos estudios, en vez del número de repeticiones a realizar dentro de la serie, se manipulan otras variables como el tiempo de recuperación entre repeticiones (Folland, et al., 2002; Rooney, et al., 1994) para modificar el grado de fatiga en cada grupo de entrenamiento. En otros estudios (Kramer, et al., 1997; Sanborn, et al., 2000) se comparó el efecto de realiza una serie hasta el fallo (8-12 RM) con varias series realizadas casi hasta el fallo con distintas cargas. Con lo cual, en estos

estudios antes mencionados (Folland, et al., 2002; Kramer, et al., 1997; Rooney, et al., 1994; Sanborn, et al., 2000), el entrenamiento difería en cuanto al número de series, repeticiones por serie, intensidad relativa, tiempo de recuperación entre series e incluso velocidad de ejecución. Así, aunque varios de estos estudios (Folland, et al., 2002; Kramer, et al., 1997; Sanborn, et al., 2000) reportaron que no entrenar hasta el fallo muscular produce una mayor incremento sobre la fuerza muscular (~22.2% vs ~31.6% para el grupo de Fallo y No fallo, respectivamente), las grandes diferencias encontradas en el protocolo de entrenamiento utilizado por cada grupo impiden conocer si las diferencias en las ganancias de fuerza fueron debidas al volumen o a otras variables de entrenamiento. Por tanto, de los 8 estudios iniciales que componen el meta-análisis realizado por Davis et al. (2016), en solo 4 de ellos se utiliza la misma intensidad relativa en ambos protocolos de entrenamiento (fallo vs. no fallo). A continuación haremos un resumen de la metodología y de los resultados obtenidos en cada uno de ellos, así como de las principales conclusiones obtenidas en el citado meta-análisis (Davies, et al., 2016).

En un primer estudio realizado por Drinkwater et al. (2005) se comparó el efecto de dos programas de entrenamiento con la misma intensidad relativa (85 - 105% de la carga correspondiente a 6RM) y número de repeticiones totales, aunque distribuidas de manera diferente para el grupo Fallo [4 x 6(6)] y No Fallo [8 x 3(6)], respectivamente. Ambos grupos mostraron mejoras significativas en la fuerza medida a través de la carga de 6RM en el ejercicio de press de banca, aunque el grupo que entrenó realizando el máximo número de repeticiones en cada serie (algunas de ellas *forzadas*) mostró un incremento significativamente mayor (+ 10.6 %) que el grupo que no llegaba hasta el fallo (+ 5.2 %). En base a estos resultados, los autores de este estudio indicaron que un mayor grado de fatiga es más beneficioso para obtener mayores ganancias de fuerza máxima (Drinkwater, et al., 2005). Posteriormente, Izquierdo et al. (2006b) llevaron a cabo un estudio en el que analizaron los cambios sobre la fuerza y la resistencia muscular, así como los cambios sobre las concentraciones basales de diferentes hormonas anabólicas y catabólicas después de 11 semanas de entrenamiento en dos grupos que diferían en el número repeticiones realizadas en cada serie de entrenamiento: 1) un grupo que realizaba el máximo número de repeticiones por serie (3 x 6-10RM; Grupo Fallo); y 2) un grupo que realizaba la mitad de las repeticiones posibles en cada serie de entrenamiento (6 x 3-5 rep; Grupo No Fallo). Después del periodo de

entrenamiento, ambos grupos mostraron mejoras significativamente similares en la fuerza máxima en los ejercicios de press de banca y media sentadilla, así como en la altura de salto vertical y el máximo número de repeticiones realizadas con el 75% 1RM en el ejercicio de media sentadilla. El grupo que entrenó hasta el fallo solo obtuvo mejoras significativamente mayores a las obtenidas por el grupo que no entrenó hasta el fallo en el número de repeticiones máximas realizadas con el 75% 1RM en el ejercicio de press de banca (Izquierdo, et al., 2006b). Otro de los hallazgos importantes de este estudio (Izquierdo, et al., 2006b) fue que el grupo que realizó el entrenamiento hasta el fallo mostró un aumento significativo de la concentración basal de IGF-1, mientras que el grupo que no entrenó hasta el fallo mostró una reducción en la concentración de cortisol. En conjunto, estos cambios en las concentraciones basales hormonales parecen indicar que no realizar series hasta el fallo genera un menor estrés y un mejor estado anabólico del músculo, lo cual favorece los procesos de recuperación y evita una posible situación de sobreentrenamiento (Izquierdo, et al., 2006b).

En estos dos estudios mencionados anteriormente (Drinkwater, et al., 2005; Izquierdo, et al., 2006b) se igualó el volumen total realizado en ambos grupos de entrenamiento. Dado que el grupo que entrenó hasta el fallo muscular realizaba un mayor número de repeticiones por serie, el grupo que no entrenaba hasta el fallo muscular tuvo que hacer un mayor número de series. Aunque esta estrategia permite disminuir el grado de fatiga global inducido por el entrenamiento (Gorostiaga, et al., 2012a; Gorostiaga, et al., 2014; Gorostiaga, et al., 2012b), es posible que realizar ese mayor número de series podría suponer que el grupo que no llega hasta el fallo esté superando el umbral de volumen *óptimo* que permite las mayores ganancias de fuerza, y por tanto, sea también innecesario e incluso perjudicial aumentar el número de series a realizar durante el entrenamiento de fuerza. Para comprobar esta hipótesis, Izquierdo-Gabarren et al. (2010) realizaron un estudio en el que compararon el efecto de tres programas de entrenamiento de fuerza en el que solo se manipulaba el número de repeticiones por serie. En este estudio participaron 43 remeros, los cuales fueron divididos en cuatro grupos según el tipo de entrenamiento de fuerza realizado: 1) Un grupo que realizó 4 ejercicios de fuerza hasta el fallo; 2) un grupo que realizó los mismos 4 ejercicios de fuerza haciendo la mitad de las repeticiones posibles en cada serie; 3) otro grupo que realizaba solo 2 ejercicios de fuerza haciendo la mitad de las repeticiones posibles; y 4) un grupo que no realizaba entrenamiento de fuerza. Después de 8 semanas de

entrenamiento, el grupo que realizaba 4 ejercicios sin llegar al fallo mostró mayores mejoras que los otros dos grupos en la fuerza máxima y la potencia desarrollada ante distintas cargas en el ejercicio de remo. Por tanto, los resultados de este estudio indican que la fuerza muscular y el propio rendimiento de remo pueden ser mejorados por la realización de un programa de entrenamiento de fuerza usando un número moderado-bajo de repeticiones por serie sin llegar hasta el fallo (5-2 repeticiones), y que si un determinado umbral de volumen es sobrepasado o drásticamente disminuido, la mejora del rendimiento puede verse comprometida (Izquierdo-Gabarren, et al., 2010). Más recientemente, Sampson & Groeller (2016) también llevaron a cabo un estudio en el que se examinó la eficiencia de entrenar hasta el fallo vs. no fallo sobre la fuerza, la hipertrofia y la actividad eléctrica muscular de los flexores del codo. Para ello, 28 hombres físicamente activos fueron divididos en 3 grupos, los cuales diferían en el número de repeticiones realizado en la serie y la velocidad de ejecución. Así, había un grupo que realizaba repeticiones hasta el fallo [4x6(6)] y ejecutaba cada repetición a una velocidad controlada (2 s fase concéntrica + 2 s fase excéntrica), mientras que los otros dos grupos realizaban dos repeticiones menos de las que podían realizar con una carga determinada [4x4(6)]. La única diferencia entre estos dos grupos era que uno ejecutaba ambas fases del movimiento (concéntrica y excéntrica) a la máxima velocidad posible, mientras que el otro realizaba la fase concéntrica a la máxima velocidad posible y la excéntrica de manera controlada (2 s). Los tres grupos de entrenamiento mostraron mejoras significativas en la 1RM, la fuerza isométrica máxima, la sección transversal y la actividad eléctrica del bíceps. A pesar de las diferencias en el volumen total de entrenamiento, no se encontraron diferencias entre el porcentaje de mejora de cada uno de los grupos. Por tanto, los resultados de este estudio vuelven a reafirmar que: 1) se pueden obtener ganancias de fuerza sin la necesidad de realizar el máximo número de repeticiones en cada serie de entrenamiento; y 2) que debe existir un umbral de volumen a partir del cual, aunque se aumente el número de repeticiones realizado, las ganancias de fuerza no se modifican. A pesar de estas evidencias, las diferencias en la velocidad de ejecución entre los grupos de entrenamiento (Sampson & Groeller, 2016) han podido influir de manera importante en las adaptaciones neuromusculares, por tanto, los resultados de este estudio deben ser tomados con precaución.

### **3.6.2. Efectos del entrenamiento de fuerza basado en la velocidad**

El entrenamiento de fuerza basado en la velocidad consiste en programar el entrenamiento en función de dos variables (González-Badillo, et al., 2011; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011): 1) la velocidad de la primera repetición, la cual está intrínsecamente relacionada con la intensidad del ejercicio de fuerza (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2014), y 2) la pérdida de velocidad dentro de la serie. Este nuevo método supone un avance cuantitativo y cualitativo en la programación del entrenamiento de fuerza en tanto que supera las limitaciones presentadas por los métodos anteriormente utilizados para programar la intensidad y el volumen de entrenamiento (ver apartados 2, 3.1.1 y 3.1.2). Así, el entrenamiento basado en la velocidad nos permite ajustar las cargas de entrenamiento de una manera más precisa, objetiva e individualizada en tiempo real con la única condición de que el deportista realice cada repetición a la máxima velocidad posible. Sin embargo, dada la novedad, diferentes aspectos relacionados con el uso de esta nueva metodología de entrenamiento aún no han sido suficientemente estudiados. La presente Tesis Doctoral está enteramente basada en la velocidad de ejecución y pretende contribuir al desarrollo del conocimiento acerca del efecto agudo y crónico producido por diferentes esfuerzos programados en función de la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad dentro de la serie.

La búsqueda en *Pubmed* de artículos que hayan analizado el efecto de entrenamiento de fuerza basados en la velocidad (*velocity-based resistance training*) genera una entrada de 8 artículos. Sin embargo, solo dos de ellos (Pareja-Blanco, et al., 2016b; Pareja-Blanco, Sánchez-Medina, Suarez-Arrones, & González-Badillo, 2016c) pueden considerarse verdaderamente como entrenamientos basados en la velocidad, ya que son los únicos que programan los ejercicios de fuerza en base a la velocidad de la primera repetición y a la pérdida de velocidad dentro de la serie. En el primero de ellos (Pareja-Blanco, et al., 2016b), se analizó el efecto de dos programas de entrenamiento de fuerza que diferían solamente en la pérdida de velocidad obtenida dentro de cada serie de entrenamiento sobre la fuerza, la capacidad de salto, el volumen muscular y el tipo de fibra. Así, ambos grupos de entrenamiento usaron la misma carga relativa (~70-85% 1RM, determinada a través de la velocidad de la primera repetición en cada serie de entrenamiento), número de series (3 series), tiempo de recuperación entre series (4 min), número de sesiones (16 sesiones) y frecuencia de entrenamiento (2 sesiones por semana). La única diferencia entre ambos programas de entrenamiento fue la pérdida de

velocidad en relación a la mejor velocidad de cada serie de entrenamiento: un grupo realizó repeticiones hasta alcanzar una pérdida de velocidad del ~40% (lo cual supuso llegar hasta el fallo en el 56% de las series de entrenamiento) y otro grupo realizó repeticiones hasta alcanzar una pérdida de velocidad del 20% (aproximadamente la mitad de las repeticiones posibles). Aunque ambos grupos experimentales mejoraron significativamente la fuerza de las piernas, el grupo que realizaba repeticiones hasta perder un 20% de velocidad mostró mayores porcentajes de cambio en toda la curva fuerza-velocidad, principalmente con cargas más bajas. Además, el grupo de menor pérdida de velocidad en la serie mostró mejoras significativas en el salto vertical (+9.5%), mientras que los cambios en el grupo de mayor pérdida de velocidad no fueron significativos (+3.5%). Aunque ninguno de los dos grupos mostró mejoras significativas en el tiempo en recorrer 20 m, cabe destacar que el grupo de mayor pérdida de velocidad en la serie empeoró su rendimiento después de las 8 semanas de entrenamiento ( $2.99 \pm 0.09$  -  $3.02 \pm 0.08$  s), mientras que el grupo de menor pérdida de velocidad en la serie mejoró ligeramente ( $3.00 \pm 0.11$  -  $2.99 \pm 0.10$  s). Por otro lado, el incremento de la sección transversal de las fibras musculares después del entrenamiento fue similar en ambos grupos, mientras que el análisis del tipo de fibra mostró que el porcentaje de fibras tipo IIX descendió significativamente en el grupo de mayor pérdida de velocidad y se mantuvo sin cambios en el grupo de menor pérdida de velocidad (Pareja-Blanco, et al., 2016b). Por último, el volumen muscular aumentó de manera significativa en ambos grupos, aunque el grupo de mayor pérdida mostró incremento porcentual mayor. Esto se debió al mayor incremento de los músculos *vastus lateralis* (VL) y *vastus intermedius* (RF), ya que el incremento en el *vastus medialis* (VM) fue similar para ambos grupos de entrenamiento. Por tanto, los resultados de este estudio sugieren que experimentar un mayor grado de fatiga, como consecuencia de una mayor pérdida de velocidad dentro de cada serie de entrenamiento, parece ser más beneficioso para la mejora de la hipertrofia muscular. Sin embargo, hacer un mayor número de repeticiones por serie induce una transformación de fibras musculares hacia isoformas más lentas, lo cual se ve reflejado en un menor incremento del rendimiento en la altura de salto vertical, el tiempo en sprint y la velocidad ante cargas bajas (Pareja-Blanco, et al., 2016b).

En otro estudio publicado recientemente (Pareja-Blanco, et al., 2016c) se volvió a analizar el efecto de dos programas de entrenamiento de fuerza que difería en la



magnitud de pérdida de velocidad alcanzada en cada serie de entrenamiento sobre el rendimiento neuromuscular en jugadores de fútbol profesionales. En este caso, las cargas de entrenamiento oscilaron entre el 50% y el 70% 1RM, y las pérdidas de velocidad dentro de la serie fueron de 15% y 30% para cada uno de los grupos experimentales, respectivamente. Después de seis semanas de entrenamiento (2 sesiones por semana), el grupo de menor pérdida de velocidad dentro de la serie mostró mejoras significativas en la fuerza de las piernas, el salto vertical y la resistencia, mientras que el grupo de mayor pérdida de velocidad en la serie solo mostró cambios significativos en el test de resistencia (Pareja-Blanco, et al., 2016c). En este caso, ninguno de los dos grupos llegaba al fallo muscular durante las series de entrenamiento, el cual se alcanza cuando se pierde un 40-50% de la velocidad inicial (González-Badillo, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), sin embargo, los resultados de este estudio están en concordancia con estudios previos (Izquierdo-Gabarren, et al., 2010; Pareja-Blanco, et al., 2016b; Sampson & Groeller, 2016) que indican que cuando se alcanza un cierto volumen de entrenamiento, realizar un mayor número de repeticiones no produce un mayor beneficio sobre las ganancias de fuerza, y puede incluso producir un empeoramiento del rendimiento en acciones de alta velocidad (Pareja-Blanco, et al., 2016c).

Por tanto, los dos únicos estudios relacionados con el entrenamiento de fuerza basados en la velocidad nos permiten decir que alcanzar una pérdida de velocidad del 20% con cargas que oscilan entre 70-85% 1RM (Pareja-Blanco, et al., 2016b), y perder un 15% de velocidad en cada serie cuando se entrena con un rango de cargas que oscila entre 50-70% 1RM (Pareja-Blanco, et al., 2016c), es un entrenamiento más eficiente para la mejora de la fuerza, la resistencia y el rendimiento en acciones de alta velocidad que entrenar con una mayor magnitud de pérdida de velocidad en la serie. Esto nos permite aproximarnos un poco más a la respuesta de cuál es el *volumen óptimo* de entrenamiento. Sin embargo, se necesitan más estudios experimentales en los que se analicen los cambios en el rendimiento después de diferentes programas de entrenamientos en los que se manipule el rango de cargas (intensidad) utilizado y el porcentaje de pérdida de velocidad dentro de la serie (por ejemplo, 10, 20, 30, 40, 50% con respecto a la máxima velocidad en la serie) para poder conocer con mayor precisión cómo se modifica la fuerza, la resistencia o la capacidad de salto en función de esas dos variables. Esto nos permitiría trazar una curva *volumen-rendimiento* o *pérdida de*

*velocidad en la serie-rendimiento* ante distintas intensidades relativas, lo cual nos ayudaría a conocer de una manera más clara cuál puede ser el volumen de entrenamiento o pérdida de velocidad en la serie que más beneficios produce sobre una variable determinada en una población concreta. Además, dado que los cambios neurales constituyen un factor clave en la mejora del rendimiento muscular, conocer los cambios en la actividad eléctrica muscular puede ser aspecto importante a estudiar para poder explicar los cambios en la fuerza o la resistencia muscular que se producen dependiendo de la pérdida de velocidad alcanzada en cada serie de entrenamiento. El **Estudio III** de la presente Tesis Doctoral está diseñado para intentar dar respuesta a todas estas cuestiones planteadas anteriormente.

## 4. Estudio I:

***La pérdida de velocidad como variable  
para controlar el volumen y estimar la  
fatiga durante el entrenamiento de  
fuerza***





## 4. Estudio I: La pérdida de velocidad como variable para controlar el volumen y estimar la fatiga durante el entrenamiento de fuerza

### 4.1. Planteamiento del Problema y Propósito de la Investigación

Uno de los principales problemas a los que tienen que hacer frente diariamente los entrenadores, preparadores físicos e investigadores es cómo controlar y cuantificar objetivamente la carga de entrenamiento realizada por los deportistas durante el entrenamiento de fuerza para maximizar el rendimiento físico. Como ya hemos descrito en el apartado **3.1. Componentes que definen la carga de entrenamiento de fuerza**, la intensidad y el volumen son las variables más importantes a considerar cuando se diseña un programa de entrenamiento de fuerza, por tanto, encontrar el medio de cuantificar de forma precisa éstas dos variables es la manera más adecuada de controlar objetivamente el entrenamiento de fuerza. En cuanto a la intensidad, son ya varios los estudios que han indicado que la velocidad de ejecución es la mejor forma de expresar objetivamente la intensidad del entrenamiento (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2014). Los resultados de estos estudios indican que existe una fuerte relación entre la velocidad de levantamiento y la carga relativa (% 1RM) en diferentes ejercicios como el press de banca (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2014), el ejercicio de remo tumbado (Sánchez-Medina, et al., 2014), la sentadilla completa (Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2017) o el ejercicio de dominadas (Sánchez-Moreno, Rodríguez-Rosell, Pareja-Blanco, Mora-Custodio, & González-Badillo, 2017), de tal manera que es posible estimar con gran precisión qué porcentaje de 1RM se está utilizando en cuanto se realiza la primera repetición, a la máxima velocidad posible, con un peso (kg) determinado (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010). Por tanto, el uso de la velocidad de ejecución permite ajustar las cargas de entrenamiento de una manera sencilla y rápida, solucionando en gran medida los inconvenientes asociados con el uso del test de 1RM o los tests de repeticiones máximas.

Por otro lado, los entrenadores e investigadores utilizan un número determinado de repeticiones a realizar en cada serie para programar el volumen de entrenamiento, la mayoría de las veces, el máximo número que se puede realizar ante una carga determinada. Sin embargo, el número máximo de repeticiones que pueden ser realizadas

ante una intensidad dada (% 1RM) presenta una alta variabilidad inter-sujeto (Sakamoto & Sinclair, 2006; Shimano et al., 2006; Terzis, et al., 2008). Por tanto, si durante una sesión de entrenamiento todos los atletas o participantes realizan el mismo número de repeticiones ante la misma carga relativa, es posible que cada uno de ellos esté experimentando un grado de esfuerzo diferente. Estas consideraciones sugieren que es necesario encontrar un mejor método que permita controlar objetivamente el volumen de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza. De acuerdo con el planteamiento anterior, más que fijar un número de repeticiones, parece más apropiado terminar cada serie de entrenamiento tan pronto como se alcance un cierto nivel de fatiga neuromuscular (González-Badillo, et al., 2011; Pareja-Blanco et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Por tanto, parece existir una falta de conocimiento en torno a esta relevante cuestión relacionada con la dosificación y control del volumen de entrenamiento, dándose las condiciones necesarias para justificar la formulación de uno o varios problemas de investigación. En este caso concreto, los problemas que nos planteamos son los siguientes:

1. ¿Cuál es el modelo de descenso de velocidad durante una serie realizada hasta el fallo muscular ejecutando cada repetición a la máxima velocidad posible ante distintas cargas?
2. ¿Cuál es el grado de fiabilidad del porcentaje de repeticiones realizadas en función de las que se podrían realizar ante una pérdida de velocidad determinada durante una serie realizada hasta el fallo muscular?
3. ¿Existen diferencias en el modelo de descenso de la velocidad durante una serie realizada hasta el fallo muscular ejecutando cada repetición a la máxima velocidad posible en diferentes ejercicios?
4. ¿Cuál es el grado de fatiga, medido a través de los cambios en las variables velocidad, fuerza y RFD, producido por una serie realizada hasta el fallo con distintas intensidades relativas?

## 4.2. Objetivos de la Investigación

La problemática objeto de estudio giró en torno a los siguientes objetivos:

5. Analizar el modelo de descenso de velocidad durante una serie realizada hasta el fallo muscular ejecutando cada repetición a la máxima velocidad posible en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.
6. Comprobar si existen diferencias en los modelos de descenso de velocidad ante distintas cargas en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.
7. Examinar la fiabilidad absoluta del porcentaje de repeticiones realizado en función de las que se podrían realizar ante una pérdida de velocidad determinada durante una serie realizada hasta el fallo muscular ante una carga determinada.
8. Estudiar la fatiga producida por una serie realizada hasta el fallo muscular a través de los cambios en la velocidad, fuerza y la RFD durante acciones estáticas y dinámicas.
9. Comparar el grado de fatiga (medido a través de la pérdida de velocidad) producido por una serie realizada hasta el fallo con distintas intensidades relativas en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.

La problemática general planteada para el **Estudio I** se abordó a través de tres estudios parciales:

- **Estudio I.1:** Análisis de la pérdida de velocidad durante una serie realizada hasta el fallo muscular ante 8 cargas distintas (50, 55, 60, 65, 70%, 75, 80 y 85% 1RM) en el ejercicio de press de banca.
- **Estudio I.2:** Comparación de la fatiga mecánica, estimada a través de acciones estáticas y dinámicas, después de una serie realizada hasta el fallo muscular con una carga del 60% de la RM, y análisis de la fiabilidad del porcentaje de repeticiones realizado ante distintas pérdidas de velocidad en la serie.

- **Estudio I.3:** Análisis y comparación de la pérdida de velocidad obtenida durante y después de una serie realizada hasta el fallo muscular ante 4 cargas distintas (50, 60, 70 y 80% 1RM) en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.



### 4.3. Hipótesis

Durante un ejercicio de fuerza isoinercial, cuando se ejecuta cada repetición a la máxima velocidad posible, se produce un descenso involuntario de la velocidad como consecuencia de la fatiga generada por las repeticiones anteriores (Enoka & Duchateau, 2008; Izquierdo et al., 2006). Si el ejercicio continúa, llegará un momento (conocido como fallo muscular) en el que el sujeto no podrá seguir desplazando la carga. A pesar de que el número de repeticiones máximas que puede ser realizado con cada intensidad relativa muestra una amplia variabilidad inter-sujeto (Izquierdo, et al., 2006; Richens & Cleather, 2014; Sakamoto & Sinclair, 2006; Shimano et al., 2006), existen dos elementos que son comunes para todos los sujetos cuando se realiza una serie hasta el fallo ante la misma intensidad relativa: 1) la velocidad de la primera repetición y 2) la velocidad de la última repetición (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Izquierdo, et al., 2006; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011; Sánchez-Medina, et al., 2014). Esto significa que el porcentaje de pérdida de velocidad máxima dentro de la serie es similar para todos los sujetos. Por tanto, nos propusimos estudiar la relación entre el porcentaje de repeticiones realizadas y la pérdida de velocidad dentro de la serie y nos basamos en la siguiente hipótesis:

***Hipótesis 1:*** *Durante una serie realizada hasta el fallo muscular ante una misma carga relativa (% 1RM), el modelo de descenso de la velocidad es similar para todos los sujetos, independientemente del número de repeticiones realizadas.*

Son varios los trabajos en los que se ha demostrado que existe un límite de velocidad para la realización de una repetición durante una serie realizada hasta el fallo (Duffey & Challis, 2007; Izquierdo, et al., 2006; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), independientemente de la intensidad relativa utilizada. Esa velocidad límite es específica de cada ejercicio y se corresponde con la velocidad a la que se obtiene 1RM en dicho ejercicio (Izquierdo, et al., 2006; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Por tanto, dado que la velocidad a la que se puede hacer la última repetición de una serie realizada hasta el fallo en un ejercicio determinado es siempre la misma, a medida que incrementa la intensidad o, lo que es equivalente, a medida que disminuye la velocidad de la primera repetición, disminuye el porcentaje máximo de pérdida de velocidad que se puede producir durante dicha serie (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) y,

como consecuencia, disminuye el número máximo de repeticiones que se puede realizar (Sakamoto & Sinclair, 2006; Shimano, et al., 2006). Además, dado que cuanto mayor es la intensidad relativa, menor es el número de repeticiones posible en la serie, cada repetición realizada representará un porcentaje mayor del total de las repeticiones posibles en la serie. Esto significa que la intensidad relativa o velocidad de la primera repetición determina tanto la velocidad absoluta de desplazamiento como la pérdida de velocidad por cada unidad de acción (por cada repetición).

Por otro lado, la pérdida de velocidad es una manifestación de la fatiga que se produce como consecuencia del deterioro de uno o varios de los factores que determinan la contracción muscular (Allen, et al., 2008; Enoka & Duchateau, 2008). Esta manifestación de la fatiga es dependiente de la acción realizada (Bigland-Ritchie, Rice, Garland, & Walsh, 1995; Enoka & Duchateau, 2008). Esto implica, entre otros factores, el tipo de activación (voluntaria o eléctrica), el tipo de contracción (concéntrica, excéntrica o isométrica), forma de generar la contracción (continua o intermitente), duración, frecuencia, intensidad del ejercicio y tipo de musculatura implicada (Barry & Enoka, 2007; Cairns, et al., 2005; Enoka & Duchateau, 2008; Halson, 2014; Sahlin, 1992). Dado que existen diferencias notables entre los ejercicios de sentadilla completa y press de banca en cuanto a masa muscular implicada en el movimiento, proporción de tipo de fibras, duración de la contracción, distancia/recorrido del movimiento, pérdida de velocidad en la serie ante la misma intensidad relativa, y velocidad de la 1RM, es probable que el modelo de descenso de velocidad sea diferente para estos dos ejercicios. Por tanto, según los argumentos expuestos, formulamos la siguiente hipótesis:

**Hipótesis 2:** *La relación entre la pérdida de velocidad dentro de la serie y el porcentaje de repeticiones realizado durante una serie realizada hasta el fallo muscular depende de la magnitud de la carga (% 1RM) y del ejercicio utilizado.*

Diversos estudios han mostrado que existe una gran variabilidad en el número de repeticiones máximas que pueden ser realizadas con una intensidad relativa determinada (Douris et al., 2006; Duffey & Challis, 2007; Izquierdo, et al., 2006; Richens & Cleather, 2014; Sakamoto & Sinclair, 2006; Shimano, et al., 2006). Como consecuencia, el número de repeticiones realizado para alcanzar un determinado porcentaje de pérdida de velocidad en la serie también presentará una alta variabilidad.

Por el contrario, parece que cuando se analizan los cambios en la velocidad durante cada repetición en relación con el número de repeticiones realizadas en términos relativos (porcentaje de repeticiones realizadas en relación al máximo realizado), todos los participantes muestran un modelo de descenso de la velocidad similar (Izquierdo, et al., 2006). Dado que el número máximo de repeticiones que puede ser realizado ante una carga determinada presenta una alta fiabilidad intra-sujeto (Mann, Ivey, Brechue, & Mayhew, 2014), es probable que el modelo de descenso de la velocidad también sea similar para cada sujeto. Por ello, formulamos la siguiente hipótesis:

**Hipótesis 3:** *El porcentaje de repeticiones realizado con respecto al número de repeticiones posible en la serie, ante una misma pérdida de velocidad, es semejante en todos los sujetos y muestra una menor variabilidad inter-sujeto que el número de repeticiones realizado ante una carga dada.*

La fuerza muscular depende tanto de factores estructurales como neurales (González-Badillo & Ribas, 2002) y, consecuentemente, se ha dividido a la fatiga en *central* o neural y *periférica* o estructural, dependiendo de los factores que se vean implicados en mayor medida tras la realización de un esfuerzo (Allen, et al., 2008; Enoka & Duchateau, 2008). Si, como parece, no todas las variables cinéticas y cinemáticas que se pueden registrar durante una contracción voluntaria isométrica y/o dinámica dependen en igual proporción de los factores determinantes de la contracción muscular (Holtermann, Roeleveld, Vereijken, & Ettema, 2007), y que el grado de empeoramiento de las funciones neuromusculares depende en gran medida del tipo de esfuerzo y contracción utilizados (Asmussen, 1979; Bigland-Ritchie, et al., 1995; Enoka & Duchateau, 2008), es probable que la fatiga se manifieste en distinta proporción dependiendo de la variable que sea tomada para medirla. Para ello formulamos las siguientes hipótesis:

**Hipótesis 4:** *La fatiga generada durante un test isoinercial realizado hasta el fallo muscular se manifiesta de manera diferente en función de cuál sea la variable tomada para cuantificarla.*

**Hipótesis 5:** *La fatiga se manifiesta de manera diferente en las variables medidas para cuantificarla en función de que la activación muscular sea dinámica o estática.*



## **4.4. Estudio I.1:**

***Análisis de la pérdida de velocidad  
durante una serie realizada hasta el  
fallo muscular ante 8 cargas distintas  
(50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 y 85% 1RM)  
en el ejercicio de press de banca***





## 4.4. Estudio I.1: Análisis de la pérdida de velocidad durante una serie realizada hasta el fallo muscular ante 8 cargas distintas (50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 y 85% 1RM) en el ejercicio de press de banca

### 4.4.1. Metodología

#### A. Tipo de Investigación

La metodología del estudio queda determinada por el *tipo de investigación* que pretendamos hacer, y más concretamente por los *objetivos* buscados, la *naturaleza* de las variables y el *nivel de control* que ejerzamos sobre las mismas.

Dadas las características de los datos, el **Estudio I.1** de la presente Tesis Doctoral es una investigación *cuantitativa*. Por el grado de manipulación de las variables y los objetivos del estudio, nuestra investigación es fundamentalmente *descriptiva*, aunque podemos considerar la variable *Intensidad Relativa (% 1RM)* como independiente. Por el enfoque del análisis de los datos, la investigación es en parte *inferencial* con las variables independientes atributivas indicadas y en parte *correlacional*. Por último, la investigación es de carácter fundamentalmente *transversal*, ya que analizamos la relación entre los datos sincrónicamente, en un momento determinado, y no consideramos los posibles cambios que pudieran producirse en el tiempo.

#### B. Muestra

En este estudio participaron 22 hombres sanos, físicamente activos (Media  $\pm$  desviación estándar: Edad:  $24.6 \pm 3.6$  años; Altura:  $1.76 \pm 0.06$  m; Masa corporal:  $75.8 \pm 7.2$  kg). Todos eran estudiantes del Grado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte con al menos 8 meses de experiencia previa en el entrenamiento de fuerza. Además, estaban familiarizados con el ejercicio de press de banca porque habían participado previamente en algunas evaluaciones y tests con nuestro grupo de trabajo.

Para poder tomar parte en la investigación, dichas personas debían cumplir los siguientes requisitos: *1)* haber realizado entrenamiento de fuerza de forma sistemática

durante, al menos, los 3 meses anteriores a la realización del estudio (un mínimo de 2 veces por semana); **2)** manifestar que no padecía ninguna enfermedad o problema de salud que pudiera suponer un riesgo ante el esfuerzo físico intenso (por ejemplo: disfunción renal, anormalidades cardíacas, enfermedades respiratorias o metabólicas, patologías osteoarticulares, etc.); **3)** manifestar no haber tomado ningún tipo de droga, medicamento o sustancia que pudiera alterar el rendimiento físico y como consecuencia los resultados del estudio; **4)** estar habituados a la realización del ejercicio de press de banca; y **5)** no realizar otro tipo de entrenamiento físico intenso, aparte del propio del estudio, durante la duración del mismo.

Una vez seleccionados los sujetos que cumplían los requisitos y confirmada su disponibilidad, y tras ser informados del propósito de la investigación y los procedimientos experimentales, todos ellos dieron su consentimiento por escrito, firmando el documento de Consentimiento Informado que se adjunta en el **ANEXO I**, antes de tomar parte en el estudio.

### **C. Diseño del Estudio**

El presente estudio fue diseñado para analizar la magnitud de pérdida de velocidad alcanzada durante una serie realizada hasta el fallo muscular ante 8 cargas distintas en el ejercicio de press de banca. En las dos semanas anteriores a la realización de los tests, se llevaron a cabo 4 sesiones de familiarización (2 sesiones por semana) que consistieron en la realización de varias series de entrenamiento ejecutando cada repetición a la máxima velocidad posible. Durante estas sesiones de familiarización, los participantes eran informados en tiempo real de la velocidad a la que estaban realizando cada repetición. En la última sesión de familiarización, los participantes llevaron a cabo un test isoinercial de cargas progresivas para conocer la relación fuerza/carga - velocidad y la repetición máxima estimada ( $1RM_{est}$ ) en el ejercicio de press de banca. Después de las evaluaciones iniciales, cada participante realizó 8 sesiones separadas por 5-7 días cada una de ellas. En cada sesión, los participantes llevaron a cabo un test de máximo número de repeticiones posibles (test de MNR), es decir, hasta el fallo muscular, con ocho intensidades relativas diferentes. La carga relativa para cada participante en cada sesión de test fue determinado a partir de la relación fuerza/carga - velocidad en el ejercicio de press de banca, ya que se ha encontrado que existe una estrecha relación



entre el % 1RM y la velocidad media propulsiva (VMP) para este ejercicio (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2014). De este modo, se usó una determinada VMP objetivo en cada sesión como estimación del % 1RM, la cual tenía que ser alcanzada durante la primera o segunda repetición del test de MNR. Dichas velocidades objetivo fueron las siguientes:  $\sim 0.93 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (50% 1RM),  $\sim 0.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (55% 1RM),  $\sim 0.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (60% 1RM),  $\sim 0.71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (65% 1RM),  $\sim 0.62 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (70% 1RM),  $\sim 0.54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (75% 1RM),  $\sim 0.47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  80% 1RM), y  $\sim 0.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (85% 1RM) (González-Badillo, et al., 2014; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2014). Para poder ajustar la velocidad de ejecución a la velocidad asociada ( $\pm 0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) con cada % 1RM objetivo de cada sesión, la carga absoluta (kg) se ajustó individualmente para cada participante.

#### D. Variables Objeto de Estudio

Las principales variables analizadas en el **Estudio I.1** fueron:

- **1RM estimada ( $1RM_{est}$ ), en kg:** Estimación de la fuerza dinámica máxima durante el ejercicio de press de banca.
- **Mejor VMP ( $VMP_{mejor}$ ), en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ :** Velocidad media propulsiva de la mejor (normalmente la primera) repetición de la serie.
- **Peor VMP ( $VMP_{última}$ ), en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ :** Velocidad media propulsiva de la última repetición de la serie.
- **Pérdida de velocidad, en (%):** Máxima pérdida de VMP obtenida dentro de cada serie definida como:  $100 \cdot (VMP_{mejor} - VMP_{última}) / VMP_{mejor}$ .
- **Carga, en kg:** Peso absoluto utilizado en cada test de MNR, en kg.
- **Repeticiones realizadas (Rep):** Máximo número de repeticiones realizadas en cada test de MNR.
- **Longitud de los brazos (LB), en m:** distancia entre el borde lateral del acromio y la punta del dedo medio.

## **E. Control de Variables Extrañas**

En un estudio de estas características, las posibles variables extrañas o contaminantes que pudieran intervenir en los resultados hacen referencia a:

### ***La validez de los instrumentos de medida***

Cada uno de los instrumentos utilizados, como se explica más adelante, mide directamente determinadas variables, por lo que está garantizada su validez con respecto a las mismas, es decir, estamos seguros de que miden lo que se pretende medir en cada caso. Además, todos los instrumentos han sido ya utilizados para el cálculo de estas variables en trabajos científicos previos en los que se ha demostrado su precisión y fiabilidad (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011; Sánchez-Medina, Perez, & González-Badillo, 2010). Igualmente, se ha contrastado su precisión calibrándolos antes de cada utilización.

### ***La ejecución técnica y el cumplimiento de los protocolos en los ejercicios que se aplicarían como entrenamiento o test***

Este aspecto se controla debidamente en el momento de realización de los tests en cada una de las sesiones programadas. Es razonable aceptar que el efecto de aprendizaje no ha existido porque, según se ha indicado: 1) cada participante tenía amplia experiencia previa, y por ello se estima que estaba suficientemente familiarizado con el ejercicio que tenía que ejecutar; y 2) se realizaron varias sesiones prácticas previas al inicio de los tests, donde se recordaba a cada sujeto las instrucciones de ejecución. Además, todas las sesiones de evaluación que componen este estudio se han llevado a cabo bajo la atenta supervisión del equipo de investigadores.

### ***La situación ambiental de cada sesión de trabajo o entrenamiento***

Las variables situacionales se han minimizado al realizar cada participante las sesiones de evaluación siempre en las mismas condiciones: 1) misma hora del día ( $\pm 1$  hora de diferencia); 2) condiciones de temperatura y humedad de la sala constantes ( $\sim 20\text{-}22^{\circ}\text{C}$  y  $\sim 55\text{-}65\%$  de humedad); 3) ausencia de actividad física previa el día de realización del test ni el anterior; 4) periodo de descanso nocturno de al menos 8 horas; 5) realización de la última comida al menos 2 horas antes de la sesión correspondiente. Además, se dieron también las instrucciones pertinentes para que los participantes mantuviesen una

dieta similar antes de las sesiones de ejercicio para evitar que este factor pudiera influir sobre los resultados obtenidos.

## F. Evaluaciones y Pruebas Físicas

### *Análisis antropométrico*

Con el propósito de describir adecuadamente la muestra, durante la última sesión de familiarización de este estudio se realizó una evaluación antropométrica a cada sujeto. Los sujetos estuvieron descalzos y con la menor ropa posible (en pantalón corto o calzoncillos) durante todas estas mediciones, las cuales se realizaron por duplicado. Las variables determinadas fueron:

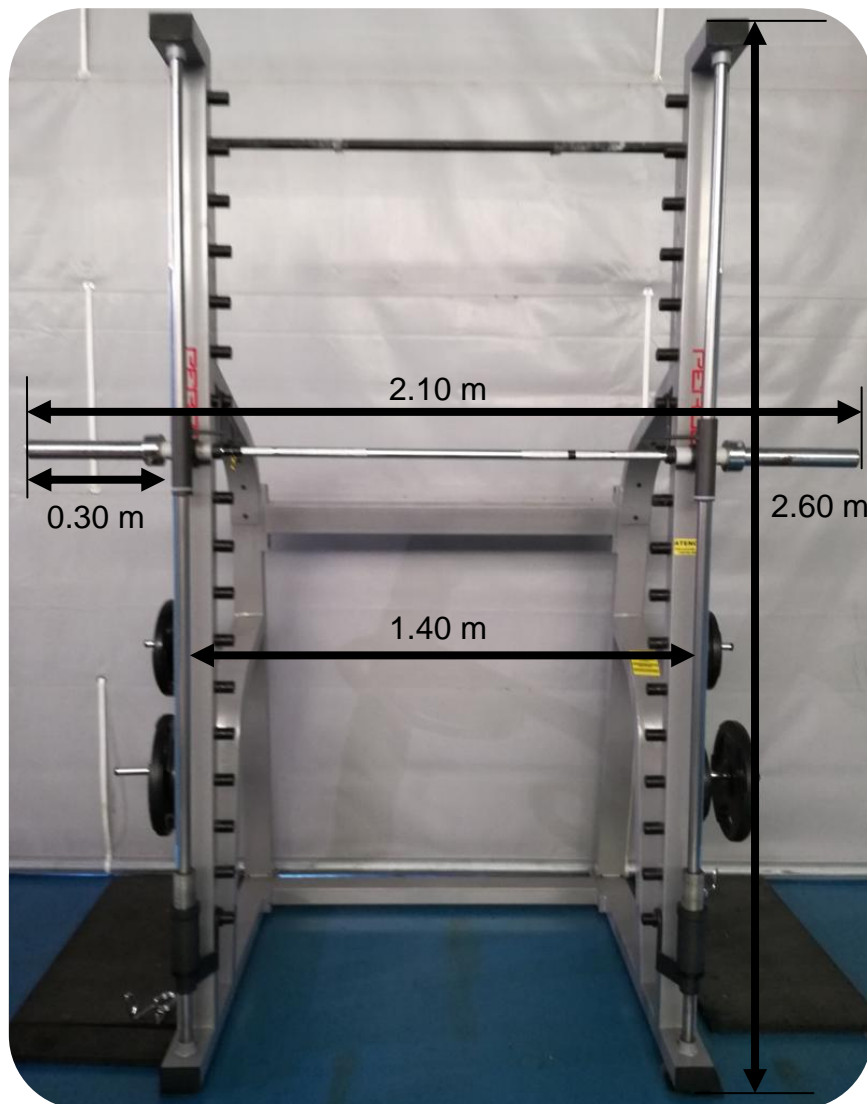
- ***Masa corporal*** (kg): se pesó a los participantes colocándolos en posición erecta, en el centro de una báscula de precisión (Seca 710, Seca Ltd., Hamburgo, Alemania).
- ***Talla*** (m): determinada como la distancia entre el vértex y las plantas de los pies. Se midió con los participantes descalzos, en bipedestación, con los talones, glúteos, espalda y región occipital en contacto con el plano vertical del tallímetro (Seca 710, Seca Ltd., Hamburgo, Alemania).
- ***Longitud del brazo*** (m): se midió con los participantes en bipedestación, con una separación entre pies similar a la anchura de los hombros, y con los brazos y los dedos de la mano extendidos. La medida fue realizada sobre el lado derecho de los participantes, desde el borde lateral del acromio hasta la punta del dedo medio usando una cinta métrica inextensible (Lufkin Ultralok, Baltimore, Maryland, USA).

### *Pruebas físicas*

- ***Test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de press de banca***: Este test se realizó sobre una máquina tipo *Smith* (**Figura 1**) y fue utilizado para medir la curva fuerza/carga - velocidad y la  $1RM_{est}$ . Para su realización, los sujetos se colocan en decúbito supino con la espalda, los glúteos y los pies apoyados sobre el banco, sujetando la barra con una empuñadura prona con una separación entre las manos

ligeramente superior a la anchura de los hombros. La posición en el banco fue ajustada para cada participante para que la proyección vertical de la barra quedara ~1-2 cm por encima de la línea intermamaria. Tanto la posición en el banco como la anchura del agarre fueron medidas para que los participantes ejecutaran el ejercicio en las mismas condiciones durante todas las sesiones de evaluación. A los participantes no se les permitió rebotar la barra en el pecho ni levantar los hombros o el tronco del banco durante la ejecución. Se colocaron dos soportes (uno a cada lado de la barra, como se indica en la **Figura 2**) regulables en altura con el fin de: (i) reproducir con precisión el rango de movimiento individual de la fase excéntrica del movimiento en las distintas sesiones de evaluación; y (ii) imponer una pausa o retraso entre las fases excéntrica y concéntrica del ejercicio. Los soportes fueron regulados en altura para que la barra quedara a ~1 cm del pecho de cada participante. Durante la ejecución del ejercicio, los participantes partían con los brazos extendidos, perpendiculares al tronco, y con la barra reposando sobre la palma de las manos. Después de bajar la barra a una velocidad excéntrica controlada ( $\sim 0.30 - 0.50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), los participantes tenían que parar la barra durante ~1.5 s sobre los soportes laterales (liberando momentáneamente el peso pero manteniendo el contacto con la barra), para posteriormente realizar una acción puramente concéntrica empujando la barra a la máxima velocidad posible hasta alcanzar de nuevo la posición inicial (**Figura 3**). La pausa momentánea impuesta entre la fase excéntrica y concéntrica tiene como función minimizar la contribución del rebote y permitir una medición más precisa, consistente y fiable de las variables mecánicas (Pallares, et al., 2014). Todos los participantes fueron instruidos para ejecutar la fase concéntrica de todas las repeticiones a la máxima velocidad posible, empujando la barra de una manera explosiva al escuchar la orden de “¡ya!” que el evaluador transmitía al participante en cuanto observaba que había realizado correctamente la parada. Antes del test, se realizó un calentamiento estandarizado que consistió en 5 min de movilidad articular de brazos seguido por dos series de 8 y 6 repeticiones (3 min de recuperación entre ellas) con 20 y 30 kg, respectivamente. La carga inicial del test para todos los participantes se estableció en 20 kg y fue incrementando progresivamente de 10 en 10 kg hasta que la VMP obtenida durante la fase concéntrica fue inferior a  $0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , la cual se corresponde con el ~88% 1RM en este ejercicio (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2014). Durante el test, se realizaron 3 repeticiones con

cargas bajas ( $VMP > 0.95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), dos con cargas medias ( $0.95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} > MPV > 0.55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), y solo una con cargas altas ( $MPV < 0.55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). El tiempo de recuperación entre series osciló entre 3 (cargas bajas) y 4 min (cargas altas). La  $1RM_{est}$  fue calculada para cada participante a partir de la VMP obtenida con la carga más alta levantada durante el test de cargas progresivas como sigue:  $(100 \cdot \text{carga}) / (8.4326 \cdot VMP^2) - (73.501 \cdot VMP) + 112.33$  (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010).



**Figura 1.** Multipower o máquina tipo *Smith* utilizada en para las evaluaciones se sentadilla completa, press de banca y salto con carga.

- **Test de máximo número de repeticiones hasta el fallo:** Antes de empezar cada test de máximo número de repeticiones posibles, se ajustó la carga propuesta (kg),

cuando fue necesario, para que la VMP máxima (normalmente la primera repetición) coincidiera con la VMP correspondiente a cada intensidad relativa:  $\sim 0.93 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (50% 1RM),  $\sim 0.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (55% 1RM),  $\sim 0.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (60% 1RM),  $\sim 0.71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (65% 1RM),  $\sim 0.62 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (70% 1RM),  $\sim 0.54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (75% 1RM),  $\sim 0.47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (80% 1RM), y  $\sim 0.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (85% 1RM) (González-Badillo, et al., 2014; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2014). Durante cada test, se le pidió a los participantes que ejecutaran cada repetición a la máxima velocidad posible durante la fase concéntrica del movimiento, hasta alcanzar el fallo muscular. Al igual que en el *test isoinercial con cargas progresivas*, los participantes fueron instruidos para que ejecutaran la fase excéntrica de cada repetición a una velocidad controlada, parar la barra sobre los soportes durante  $\sim 1.5 \text{ s}$ , y a continuación empujar la barra a la máxima intensidad posible una vez que escucharan la señal de salida emitida por el evaluador. Antes de cada test de MNR, los sujetos llevaron a cabo un calentamiento estandarizado que consistió en 5 min de movilidad articular de brazos seguido por 2-4 series de 6-2 repeticiones (3 min de recuperación entre ellas) con cargas progresivas hasta alcanzar el peso máximo programado para ese día.



**Figura 2.** Soporte regulable en altura acoplado a la guía vertical para poder colocar la barra a la altura deseada.



**Figura 3.** Representación gráfica de la ejecución del ejercicio de press de banca mostrando las posiciones de inicio y fin de la fase concéntrica.

## G. Instrumental de Evaluación

### *Máquina tipo Smith*

Todos los tests y evaluaciones fueron realizadas en una máquina tipo *Smith* (Multipower Fitness Line, Peroga, Murcia, España). Esta máquina tiene unas dimensiones de 2.60 m de altura, 2.10 m de ancho y 1.20 m de profundidad, y dispone de dos guías verticales para asegurar el desplazamiento vertical de la barra durante todo el movimiento. Además, dispone de rodamientos de alta calidad que minimizan la fricción de la barra con las guías, con el fin de asegurar la mayor precisión y fiabilidad posible en las mediciones mecánicas (**Figura 1**).

### *Transductor lineal de velocidad*

La velocidad de todas las repeticiones fue registrada con un transductor lineal de velocidad (*T-FORCE Dynamic Measurement System2*, Ergotech Consulting S.L., Murcia, España). El sistema está basado en un transductor lineal - tacogenerador de alta precisión - (*V Series*, Unimeasure, Corvalis, EE.UU.) que realiza una medición directa de la velocidad de desplazamiento vertical a la que se extiende o retrae el cable de 2 m que tiene incorporado (**Figura 4**). Un software desarrollado a medida distingue automáticamente las distintas repeticiones y fases (excéntrica/concéntrica) dentro de una ejecución, permitiendo registrar múltiples series de ejercicio y controlar el entrenamiento de varios deportistas a la vez. Hardware y software se conectan a través

de un interfaz USB, el cual consta de una tarjeta electrónica de adquisición de datos dotada de un conversor A/D de 14 bits de resolución que transforma la señal analógica emitida por el transductor en una señal digital que es recibida por el software. La frecuencia de muestreo es de 1.000 Hz, esto es, se recoge un dato de velocidad cada milisegundo. El software del dispositivo tiene incorporado el cálculo de la fase propulsiva del movimiento. La fase propulsiva se define como aquella parte de la fase concéntrica durante la cual la aceleración es mayor que la debida a la gravedad (i.e.  $a \geq -9,81\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ); mientras que la fase de frenado correspondería al resto de la fase concéntrica, aquella durante la cual  $a < g$ . Este dispositivo ha mostrado tener una alta fiabilidad en la medición de las distintas variables mecánicas (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), y ha sido utilizado en multitud de trabajos científicos (González-Badillo, et al., 2014; González-Badillo et al., 2016; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Mora-Custodio, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2014; Pareja-Blanco, et al., 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016; Pareja-Blanco, Sánchez-Medina, Suarez-Arrones, & González-Badillo, 2016; Rodríguez-Rosell et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011; Sánchez-Medina, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2010).



Figura 4. Dispositivo **T-FORCE System** para la evaluación y el entrenamiento de la fuerza.



## H. Plan de trabajo

Cada participante realizó un total de 9 sesiones de evaluación (un test de cargas progresivas y 8 tests de MNR ante diferentes intensidades relativas) separadas por 5-7 días. Se establecieron 8 turnos (10:00 h, 11:00 h, 12:00 h, 13:00 h, 16:00 h, 17:00 h, 18:00 h y 19:00 h) durante cada día para que los participantes pudieran elegir la hora a la que realizar los esfuerzos. Después de la primera sesión de evaluación, se prestó especial atención en que los participantes realizaran las siguientes sesiones a la misma hora ( $\pm 1$ h) para intentar eliminar posibles variables contaminantes. Para poder controlar adecuadamente las sesiones de evaluación, el número máximo de participantes en cada turno fue de 2. Cada sesión tuvo una duración aproximada de 30-35 min. La duración máxima del estudio, incluyendo las sesiones de familiarización, fue de 9 semanas. En la **Tabla 1** aparece un ejemplo de la distribución de las sesiones para un participante representativo del estudio.

**Tabla 1.** Esquema temporal que muestra la distribución de las sesiones de familiarización y las sesiones de evaluación para un participante representativo del estudio.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes	Sábado	Domingo
<b>Semana 1</b>	Familiarización			Familiarización			
<b>Semana 2</b>	Familiarización			Test de 1RM <sub>est</sub>			
<b>Semana 3</b>		Test MNR (50% 1RM)					
<b>Semana 4</b>	Test MNR (55% 1RM)						
<b>Semana 5</b>			Test MNR (60% 1RM)				
<b>Semana 6</b>				Test MNR (65% 1RM)			
<b>Semana 7</b>		Test MNR (70% 1RM)					
<b>Semana 8</b>	Test MNR (75% 1RM)						
<b>Semana 9</b>	Test MNR (80% 1RM)				Test MNR (85% 1RM)		

1RM<sub>est</sub>: Una repetición máxima estimada; MNR: Test de máximo número de repeticiones posibles hasta el fallo muscular.

## I. Análisis estadístico

Se utilizaron métodos estadísticos estandarizados para el cálculo de la media y la desviación típica (DT), el coeficiente de variación (CV) y el coeficiente de correlación

de *Pearson* ( $r$ ). Se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk para comprobar la normalidad de la distribución en cada una de las variables. Las diferencias en cada una de las variables analizadas entre cada una de las cargas usadas (50 - 85% 1RM, con incrementos de 5%) fue analizada usando el test ANOVA de un factor con medidas repetidas con el correspondiente test *post-hoc* de *Bonferroni* para detectar las diferencias entre las medias. La relación entre el porcentaje de pérdida de VMP y el porcentaje de repeticiones realizadas con las diferentes intensidades relativas utilizadas fue estudiado mediante un ajuste polinómico de segundo grado. Del mismo modo, las relaciones entre la intensidad relativa, el número de repeticiones máximas y el porcentaje de pérdida de velocidad obtenido en cada test de MNR también fue estudiado a través de un ajuste polinómico de segundo grado. El nivel de significación estadístico se fijó en el 5% ( $P \leq 0.05$ ). Todos los análisis fueron realizados utilizando el paquete de software estadístico SPSS versión 17.0 (SPSS, Chicago, IL).

#### 4.4.2. Resultados

En la **Tabla 2** aparece un resumen de las principales variables analizadas durante cada una de las 8 series hasta el fallo realizadas en el presente estudio. No se observaron diferencias significativas entre los valores de VMP objetivo y el promedio del valor más alto de VMP ( $VMP_{\text{mejor}}$ ) alcanzado en cada una de las series con ninguna de las cargas usadas. El promedio de la VMP de la última repetición de cada serie ( $VMP_{\text{última}}$ ) fue similar para todas las cargas utilizadas (**Tabla 2**).

**Tabla 2.** Variables descriptivas de las series realizadas hasta el fallo muscular ante las 8 intensidades relativas estudiadas.

Intensidad (% 1RM)	$VMP_{\text{mejor}}$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$VMP_{\text{última}}$ ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	PV (%)	Rep	Carga (kg)
50% ( $\sim 0.93 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$0.93 \pm 0.01$ (0.91 - 0.94)	$0.14 \pm 0.03$ (0.09 - 0.22)	$84.7 \pm 3.7$ <sup>c,d,e,f</sup> (76.1 - 90.5)	$25.7 \pm 5.8$ <sup>a,b,c,d,e,f</sup> (19 - 40)	$37.7 \pm 5.2$ <sup>b,c,d,e</sup> (27.5 - 45.0)
55% ( $\sim 0.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$0.86 \pm 0.01$ (0.84 - 0.88)	$0.14 \pm 0.04$ (0.08 - 0.22)	$83.2 \pm 4.6$ <sup>d,e,f</sup> (74.4 - 90.1)	$22.7 \pm 4.4$ <sup>b,c,d,e,f</sup> (16 - 32)	$40.9 \pm 7.5$ <sup>c,d,e</sup> (29.0 - 55.0)
60% ( $\sim 0.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$0.79 \pm 0.01$ (0.77 - 0.81)	$0.13 \pm 0.02$ (0.09 - 0.19)	$82.5 \pm 3.1$ <sup>d,e,f</sup> (76.3 - 88.1)	$19.6 \pm 3.4$ <sup>c,d,e,f</sup> (15 - 26)	$44.3 \pm 6.7$ <sup>c,d,e</sup> (30.0 - 54.0)
65% ( $\sim 0.71 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$0.71 \pm 0.01$ (0.69 - 0.73)	$0.14 \pm 0.04$ (0.07 - 0.25)	$80.4 \pm 5.9$ <sup>d,e,f</sup> (66.1 - 90.1)	$16.2 \pm 3.4$ <sup>d,e,f</sup> (12 - 22)	$46.8 \pm 11.9$ <sup>d,e</sup> (34.5 - 61.0)
70% ( $\sim 0.62 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$0.62 \pm 0.01$ (0.60 - 0.64)	$0.13 \pm 0.03$ (0.06 - 0.18)	$79.2 \pm 4.7$ <sup>e,f</sup> (70.5 - 90.3)	$12.6 \pm 2.7$ <sup>e,f</sup> (9 - 19)	$54.1 \pm 7.7$ <sup>e</sup> (34.5 - 65.0)
75% ( $\sim 0.54 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$0.54 \pm 0.01$ (0.52 - 0.56)	$0.13 \pm 0.02$ (0.08 - 0.19)	$75.7 \pm 4.4$ <sup>f</sup> (65.6 - 84.0)	$9.8 \pm 1.7$ <sup>f</sup> (7 - 13)	$57.5 \pm 13.8$ (39.0 - 72.5)
80% ( $\sim 0.47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$0.47 \pm 0.01$ (0.45 - 0.49)	$0.12 \pm 0.02$ (0.08 - 0.16)	$73.6 \pm 5.3$ <sup>f</sup> (65.9 - 82.9)	$7.7 \pm 1.5$ (5 - 10)	$63.0 \pm 7.6$ (44.0 - 75.0)
85% ( $\sim 0.39 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$0.39 \pm 0.01$ (0.37 - 0.41)	$0.14 \pm 0.02$ (0.11 - 0.18)	$63.9 \pm 5.1$ (54.8 - 73.2)	$4.9 \pm 1.2$ (4 - 8)	$68.3 \pm 10.4$ (48.0 - 88.0)

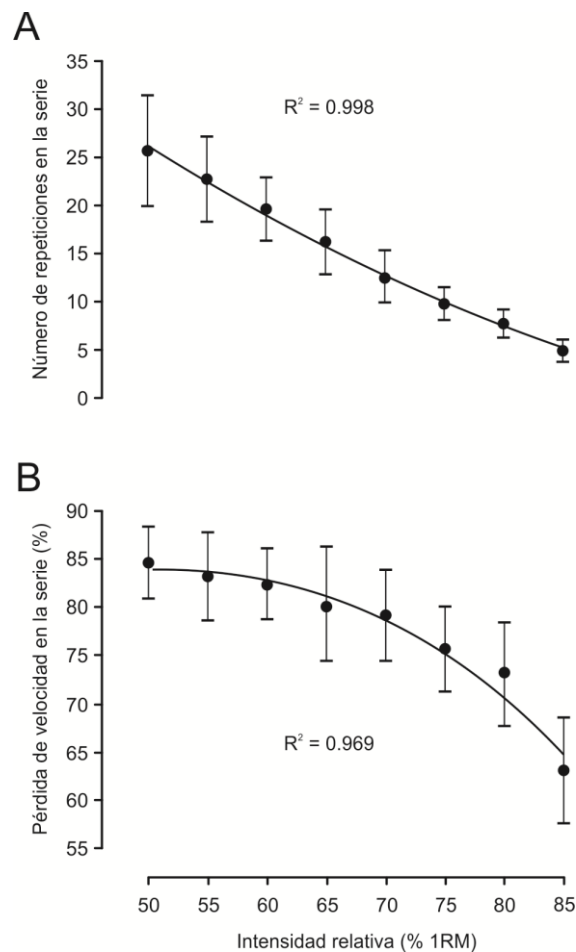
Los datos son medias  $\pm$  DT (rango).

1RM: Una repetición máxima; PV: Pérdida de velocidad; Rep: número de repeticiones completadas en la serie;  $VMP_{\text{mejor}}$ : Velocidad media propulsiva de la repetición más rápida de la serie (normalmente la primera repetición);  $VMP_{\text{última}}$ : Velocidad media propulsiva de la última repetición de la serie.

Diferencias estadísticamente significativas con respecto a: <sup>a</sup> 60% 1RM; <sup>b</sup> 65% 1RM; <sup>c</sup> 70% 1RM; <sup>d</sup> 75% 1RM; <sup>e</sup> 80% 1RM; <sup>f</sup> 85% 1RM.

A medida que incrementó la intensidad relativa, tanto el número de repeticiones realizadas ( $R^2 = 0.998$ ) como la magnitud de pérdida de velocidad en la serie ( $R^2 = 0.969$ ) descendieron progresivamente (**Tabla 2; Figura 5**). El número máximo de

repeticiones realizadas ante cada intensidad relativa mostró una alta variabilidad inter-sujeto (CV: 17.3 - 23.5%; **Tabla 3**), y generalmente no mostró relación con ninguna variable antropométrica (masa corporal, talla, longitud del brazo) o mecánica ( $VMP_{mejor}$ ,  $VMP_{última}$ , pérdida de velocidad dentro de la serie,  $1RM_{est}$ ,  $1RM_{est} / \text{masa corporal}$ ) (**Tabla 4**).



**Figura 5.** Relación entre la intensidad relativa y el número máximo de repeticiones realizadas en la serie **(A)** y el porcentaje de pérdida de VMP **(B)** durante cada serie realizada hasta el fallo en el ejercicio de press de banca (ver el texto para más detalles). Las líneas verticales de error representan la DT.

**Tabla 3.** Coeficiente de variación (CV) para: i) el número de repeticiones realizadas con cada intensidad relativa; y ii) el porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo número posible cuando se alcanza un determinado valor de pérdida de velocidad en una serie realizada hasta el fallo con la correspondiente intensidad relativa.

Intensidad (% 1RM)	CV (%) para Rep	CV (%) para cada porcentaje de pérdida de VMP												
		15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%
50% (-0.93 m·s <sup>-1</sup> )	22.4	11.6	10.1	9.8	9.5	9.1	8.8	8.1	7.3	6.5	5.1	4.2	3.8	3.1
55% (-0.86 m·s <sup>-1</sup> )	19.5	11.1	10.6	9.9	9.1	8.4	7.9	7.2	6.3	5.5	4.7	3.8	3.1	2.5
60% (-0.79 m·s <sup>-1</sup> )	16.8	11.4	10.9	9.5	8.5	7.6	6.9	6.3	5.6	5.0	4.5	4.0	3.6	3.0
65% (-0.71 m·s <sup>-1</sup> )	20.9	8.5	7.5	7.0	6.5	6.1	5.7	5.2	4.6	4.1	3.5	3.1	2.7	2.7
70% (-0.62 m·s <sup>-1</sup> )	21.5	11.0	10.5	9.7	8.8	8.1	7.4	6.8	6.1	5.4	4.8	4.4	4.1	4.1
75% (-0.54 m·s <sup>-1</sup> )	17.5	10.9	10.3	9.8	9.2	8.5	7.8	7.1	6.3	5.5	4.7	4.0	3.5	3.5
80% (-0.47 m·s <sup>-1</sup> )	18.9	11.2	10.8	10.3	9.9	9.1	8.5	7.8	7.0	6.2	5.6	5.0	4.3	4.1
85% (-0.39 m·s <sup>-1</sup> )	23.5	12.1	11.0	10.1	9.2	8.3	7.4	6.5	5.5	4.6	3.8	3.3		

1RM: Una repetición máxima; VMP: Velocidad media propulsiva; Rep: número de repeticiones completadas en la serie.  
Nota: El CV para el porcentaje de repeticiones realizado cuando se alcanza una pérdida de velocidad del 70% y el 75% con una intensidad relativa del 85% 1RM no aparecen en la tabla porque la máxima pérdida de velocidad que puede ser alcanzada en una serie hasta el fallo con esta intensidad relativa es aproximadamente del 65%.

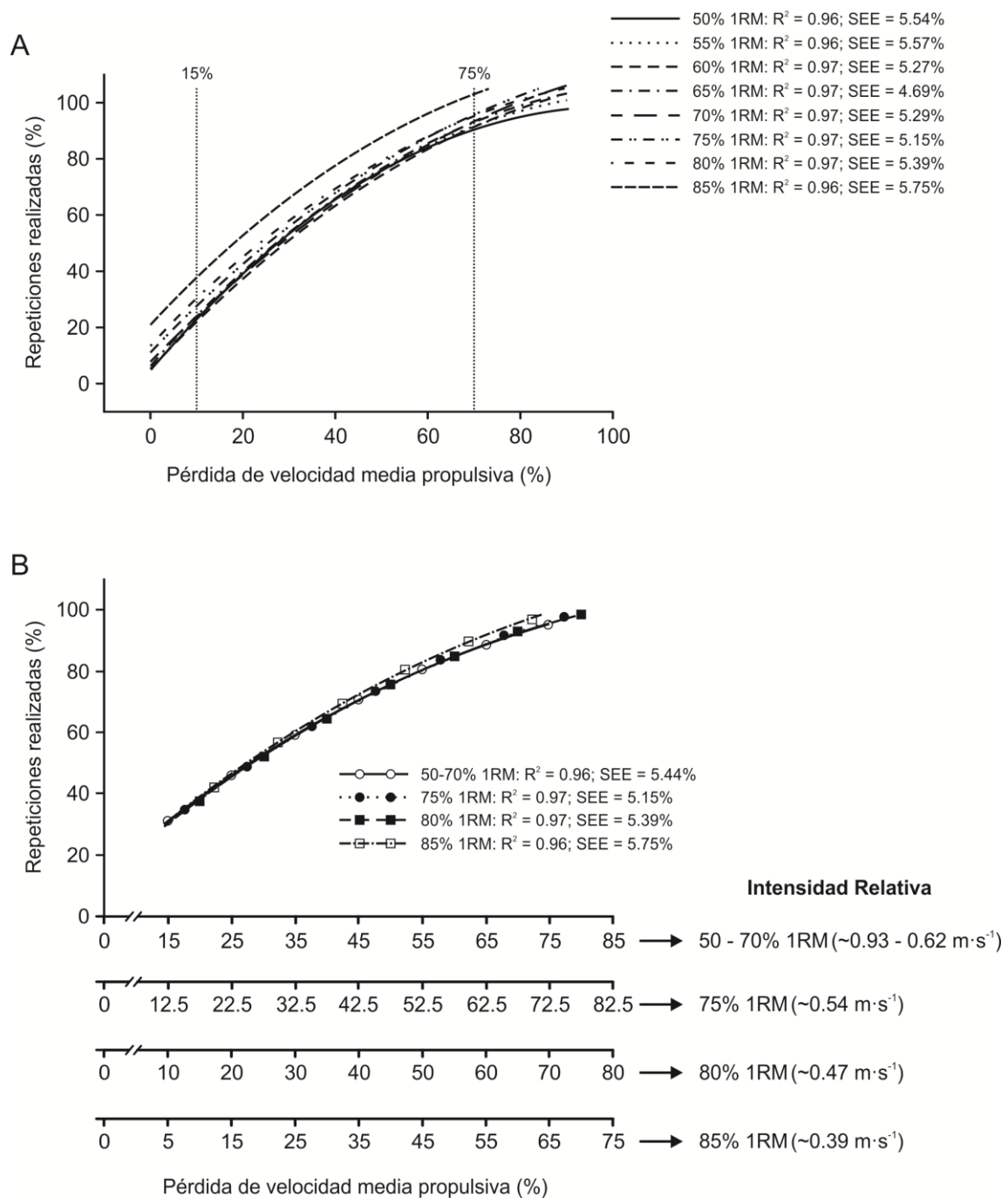
**Tabla 4.** Coeficientes de correlación entre el número de repeticiones realizado en cada serie hasta el fallo y varias variables mecánicas y antropométricas.

Intensidad (% 1RM)	MC (kg)	Talla (m)	LB (m)	VMP <sub>mejor</sub> (m·s <sup>-1</sup> )	VMP <sub>última</sub> (m·s <sup>-1</sup> )	PV (%)	Carga (kg)	1RM <sub>est</sub> (kg)	1RM <sub>est</sub> /MC
50% (~0.93 m·s <sup>-1</sup> )	0.20	-0.17	-0.25	0.35	0.17	-0.15	-0.17	-0.12	-0.32
55% (~0.86 m·s <sup>-1</sup> )	-0.44*	-0.43*	-0.46*	0.05	-0.34	0.34	-0.50*	-0.35	-0.04
60% (~0.79 m·s <sup>-1</sup> )	-0.17	-0.43*	-0.41	0.29	0.06	-0.05	-0.61**	-0.53*	-0.56*
65% (~0.71 m·s <sup>-1</sup> )	0.21	-0.10	-0.25	0.04	-0.21	0.21	0.18	0.41	0.48*
70% (~0.62 m·s <sup>-1</sup> )	-0.12	-0.50*	-0.44*	-0.24	-0.19	0.17	-0.45*	-0.49*	-0.56*
75% (~0.54 m·s <sup>-1</sup> )	-0.11	-0.12	-0.35	0.37	-0.17	0.22	-0.17	0.16	0.25
80% (~0.47 m·s <sup>-1</sup> )	0.09	0.01	-0.19	0.35	-0.08	0.07	0.00	-0.02	-0.13
85% (~0.39 m·s <sup>-1</sup> )	0.07	0.16	0.16	0.08	-0.58 **	-0.56 **	-0.09	0.05	-0.01

MC: Masa corporal; LB: Longitud del brazo; PV: Pérdida de velocidad; MP<sub>mejor</sub>: Velocidad media propulsiva de la repetición más rápida de la serie (normalmente la primera repetición); VMP<sub>última</sub>: Velocidad media propulsiva de la última repetición de la serie. 1RM<sub>est</sub>: Una repetición máxima estimada. Correlaciones estadísticamente significativas: \* p < 0.05; \*\* p < 0.01

El porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo número de repeticiones completadas en cada serie hasta el fallo muscular cuando se alcanzaba un determinado valor de pérdida de velocidad (desde el 15% al 75%) fue muy similar para todas las cargas comprendidas entre el 50% y el 70% 1RM (**Tabla 5**). Sin embargo, los porcentajes de repeticiones realizados para una determinada pérdida de velocidad fueron progresivamente mayores para el 75%, 80% y 85%, respectivamente (**Figura 6**). El CV para el porcentaje de repeticiones realizado en cada serie hasta el fallo muscular osciló entre 2.7 y 12.1%, dependiendo de la pérdida de velocidad alcanzada en la serie (**Tabla 3**).

La ecuación de predicción para estimar el porcentaje de repeticiones realizado (% Rep) cuando se alcanza una determinada magnitud de pérdida de velocidad en una serie con intensidades relativas del 50% - 70% 1RM en el ejercicio de press de banca fue: % Rep =  $-0.00855 \cdot \text{pérdida de VMP}^2 + 1.83311 \cdot \text{pérdida de VMP} + 5.55281$  ( $R^2 = 0.964$ ; SEE = 5.44%). Para el 75% 1RM, la ecuación resultante fue: % Rep =  $-0.00705 \cdot \text{pérdida de VMP}^2 + 1.71404 \cdot \text{pérdida de VMP} + 10.74584$  ( $R^2 = 0.968$ ; SEE = 5.15%), mientras que para el 80% 1RM la ecuación fue: % Rep =  $-0.00780 \cdot \text{pérdida de VMP}^2 + 1.72215 \cdot \text{pérdida de VMP} + 13.38519$  ( $R^2 = 0.965$ ; SEE = 5.39%). Por último, la ecuación de predicción resultante para el 85% 1RM fue: % Rep =  $-0.00813 \cdot \text{pérdida de VMP}^2 + 1.74323 \cdot \text{pérdida de VMP} + 20.88282$  ( $R^2 = 0.960$ ; SEE = 5.75%).



**Figura 6.** Relación entre la magnitud de pérdida de velocidad alcanzada en la serie y el porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo -fallo muscular- número de repeticiones que pueden ser completadas en el ejercicio de press de banca. **A** El porcentaje de repeticiones realizado cuando se alcanza un determinado valor de pérdida de velocidad en la serie (desde el 15% al 75%) fue similar para todas las cargas entre el 50% y el 70% 1RM, pero éste fue progresivamente mayor para el 75, 80 y 85% 1RM, respectivamente. **B** Para las cargas del 75, 80 y 85% 1RM, ante un mismo porcentaje de repeticiones realizado, las pérdidas de velocidad en la serie fueron inferiores ( $\sim 2.5$ ,  $\sim 5$  y  $\sim 10\%$ , respectivamente) a las obtenidas con cargas que oscilan entre el 50% y el 70% 1RM.

**Tabla 5.** Porcentaje de repeticiones realizadas con respecto al máximo número que pueden ser completadas cuando se alcanza una determinada magnitud de pérdida de velocidad en una serie realizada hasta el fallo con cargas que oscilan entre el 50 y el 70% de 1RM.

Intensidad (% 1RM)	Pérdida de velocidad (%)												
	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	65%	70%	75%
50% (~0.93 m·s <sup>-1</sup> )	31.2	39.1	46.4	53.3	59.7	65.6	71.0	75.9	80.3	84.2	87.6	90.6	93.0
55% (~0.86 m·s <sup>-1</sup> )	31.4	39.3	46.7	53.6	60.1	66.1	71.6	76.7	81.3	85.5	89.2	92.4	95.1
60% (~0.79 m·s <sup>-1</sup> )	29.8	37.3	44.3	51.1	57.4	63.4	69.0	74.2	79.1	83.6	87.7	91.4	94.8
65% (~0.71 m·s <sup>-1</sup> )	32.1	39.8	47.1	53.9	60.4	66.4	72.0	77.2	82.0	86.3	90.3	93.8	96.9
70% (~0.62 m·s <sup>-1</sup> )	31.5	38.7	45.7	52.3	58.6	64.5	70.1	75.4	80.4	85.0	89.3	93.3	96.9
Media ± DT	31.2 ± 0.8	38.8 ± 1.0	46.0 ± 1.1	52.8 ± 1.2	59.2 ± 1.2	65.2 ± 1.2	70.7 ± 1.2	75.9 ± 1.2	80.6 ± 1.1	84.9 ± 1.1	88.8 ± 1.1	92.3 ± 1.3	95.4 ± 1.6
CV (%)	2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	1.9	1.7	1.5	1.4	1.3	1.3	1.4	1.7

1RM: Una repetición máxima; VMP: Velocidad media propulsiva; CV: Coeficiente de variación.



### 4.4.3. Discusión

El objetivo de este estudio fue analizar el modelo de descenso de la velocidad durante una serie realizada hasta el fallo muscular con 8 intensidades relativas diferentes. De acuerdo con estudios previos (Izquierdo et al., 2006; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), se encontró un descenso progresivo en la VMP durante la serie, lo que significa que la realización de las repeticiones se hizo progresivamente más difícil debido al incremento de la fatiga (Izquierdo, et al., 2006). Sin embargo, el principal hallazgo de este estudio fue que existe una fuerte relación entre la pérdida relativa de velocidad dentro de la serie y el porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo número de repeticiones que pueden ser completadas en la serie (**Figura 6**). Este hallazgo es relevante en sí mismo y desde el punto de vista práctico, dado que, mediante el control de la velocidad de cada repetición durante el entrenamiento de fuerza, se puede estimar con una alta precisión cuantas repeticiones se están dejando sin hacer (*repeticiones en reserva*) durante una serie, lo cual se corresponde con el concepto de “*carácter del esfuerzo*” o “*grado de esfuerzo*” (González-Badillo & Ribas, 2002; González-Badillo et al., 2016; González Badillo & Gorostiaga, 1995; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011).

Uno de los aspectos relevantes del presente estudio fue que, mediante el control de la velocidad de cada repetición y el ajuste de las cargas (kg) que tenían que levantar los participantes en función de la curva fuerza/carga - velocidad para el ejercicio de press de banca (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2014), podíamos estar seguros de que todos los participantes realizaron cada test con una intensidad relativa (% 1RM) muy similar. De hecho, la máxima diferencia en la  $VMP_{mejor}$  entre participantes fue de solo  $0.04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para cada una de las 8 cargas utilizadas (**Tabla 2**), lo cual representa una variación máxima de 2.0 - 3.3% en la intensidad relativa con la que todos los participantes realizaron los tests (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010). Estudios previos en que se ha analizado el modelo de descenso de la velocidad durante una serie realizada hasta el fallo muscular (Iglesias, Boullosa, Dopico, & Carballeira, 2010; Izquierdo, et al., 2006) no han usado la velocidad de la primera repetición (la más rápida) de la serie para determinar la intensidad relativa (% 1RM). Es decir, estos estudios no comprobaron si la carga *real* usada por los participantes se correspondía con la carga *propuesta* o *prescrita*. Por otro lado, el promedio de la velocidad media de la última repetición de la serie fue muy

similar para todas las intensidades relativas utilizadas en el presente estudio ( $0.12 - 0.14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), lo cual está en concordancia con los datos reportados para la velocidad de la 1RM ( $\sim 0.14 - 0.15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) en el ejercicio de press de banca (Duffey & Challis, 2007; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Izquierdo, et al., 2006; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Estos resultados confirman que los participantes realizaron los tests de MNR hasta el fallo muscular, ya que durante un esfuerzo de estas características, la velocidad de la última repetición se corresponde con la velocidad propia de la 1RM en ese ejercicio.

Por otra parte, el número de repeticiones realizado durante cada uno de los 8 tests de MNR descendió progresivamente a medida que incrementó la intensidad relativa (**Tabla 2; Figura 5**). Este fue un resultado esperado y estaba en concordancia con otros estudios publicados anteriormente (Izquierdo, et al., 2006; Sakamoto & Sinclair, 2006; Shimano et al., 2006). Sin embargo, otro hallazgo digno de ser mencionado fue que el número máximo de repeticiones realizado con cada intensidad relativa (50 - 85% 1RM) mostró una alta variabilidad inter-sujeto ( $\text{CV} = \sim 20\%$ ; **Tabla 3**), con el mínimo número de repeticiones realizado representando aproximadamente el 50% del máximo número de repeticiones realizado para las 8 intensidades relativas utilizadas (**Tabla 2**). Estos resultados fueron sorprendentes teniendo en cuenta que todos los participantes tenían experiencia en el entrenamiento de fuerza y que realizaron cada test de MNR con la misma intensidad relativa. Por el contrario, el porcentaje de repeticiones realizado ante las distintas magnitudes de pérdida de velocidad analizadas en la serie mostró valores de CV claramente más bajos que el número máximo de repeticiones realizado (**Tabla 3**).

Por otro lado, en general, no se encontraron relaciones significativas claras entre el número de repeticiones realizado con cada una de las intensidades relativas utilizadas y las variables mecánicas y antropométricas medidas en el presente estudio (**Tabla 4**). Otros estudios tampoco han encontrado relaciones significativas entre el número de repeticiones realizadas ante una carga determinada y la 1RM o la 1RM/masa corporal (Iglesias, et al., 2010; Terzis, et al., 2008). Sin embargo, algunas investigaciones han encontrado que el número máximo de repeticiones realizado mostró una relación positiva significativa con el número de capilares por  $\text{mm}^2$  de área de sección transversal del músculo (Terzis, et al., 2008), y una relación negativa significativa con el porcentaje de fibras tipo II (Douris et al., 2006). Por tanto, parece que la alta variabilidad observada en el número máximo de repeticiones realizado ante una intensidad relativa

determinada podría depender, al menos en parte, de las características musculares específicas y del tipo y duración del entrenamiento previo realizado por cada individuo (Richens & Cleather, 2014).

La fuerte relación encontrada entre el porcentaje de pérdida de velocidad y el porcentaje de repeticiones realizado fue muy similar para todas las cargas comprendidas entre 50 - 70% 1RM (CV = 1.3 - 2.7%; **Tabla 5; Figura 6A**), a pesar de que el número medio de repeticiones realizado con cada una de estas intensidades fue muy distinto (**Tabla 2**). Para cargas superiores al 70% (75, 80 y 85% 1RM), el porcentaje de repeticiones realizado para una magnitud de pérdida de velocidad determinada fue ligeramente superior en comparación con los valores observados antes intensidades relativas del 50 - 70% 1RM (**Figura 6A**). Concretamente, un análisis detallado de los resultados parece indicar que para realizar un porcentaje de repeticiones similar al mostrado con cargas del 50 - 70% 1RM, el porcentaje de pérdida de velocidad en la serie con cargas del 75, 80 y 85% 1RM debería ser inferior (~2.5, ~5 y ~10%, respectivamente; **Figura 6B**). Este es el motivo por el que se han proporcionado 4 ecuaciones diferentes (una para intensidades comprendidas entre al 50 y el 70% de 1RM, y sendas ecuaciones para el 75, 80 y 85% 1RM) para predecir el porcentaje de repeticiones realizado a partir de la pérdida de VMP dentro de la serie (apartado **4.4.2. Resultados**). Estas ecuaciones pueden ser fácilmente implementadas en un software o una hoja de cálculo para poder estimar en *tiempo real* el *grado de esfuerzo* que está siendo inducido en cada sesión de entrenamiento, permitiendo, por tanto, un mejor control del estímulo de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza.

Las estrechas relaciones ( $R^2 = 0.96 - 0.97$ ) observadas en el presente estudio entre la pérdida relativa de velocidad y el porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo número posible que se pueden completar hacen posible determinar con notable precisión el porcentaje de repeticiones que ha sido completado tan pronto como se detecta un porcentaje de pérdida de velocidad determinado. Así, por ejemplo, nuestros resultados indican que cuando un individuo alcanza un 30% de pérdida de VMP durante una serie realizada con el 50 - 70% 1RM en el ejercicio de press de banca, dicho individuo habrá completado aproximadamente el 50% de las repeticiones posibles que puede hacer con esa carga, dejando, como consecuencia, el otro 50% de las repeticiones sin hacer. Si dicho individuo continúa realizando repeticiones hasta alcanzar un 50% de pérdida de VMP dentro de la serie, entonces, el porcentaje de repeticiones completado

habría aumentado hasta aproximadamente el 75%, dejando tan solo el 25% de repeticiones en *reserva* (**Tabla 5; Figura 6**). Esto representa un novedoso método para controlar el volumen de entrenamiento durante el entrenamiento de fuerza con cargas externas, lo cual nos permite: (1) determinar el *grado de esfuerzo* real que realiza un atleta durante cada serie de entrenamiento; e (2) igualar el *grado de esfuerzo* para cada sujeto durante el entrenamiento de fuerza. Esto es posible en la actualidad gracias a un número cada vez mayor de sistemas de medición portátiles disponibles (transductores lineales de posición y velocidad, acelerómetros y unidades de medición inercial) que permiten registrar y controlar la velocidad de cada repetición en tiempo real. Por tanto, tomados de manera conjunta, nuestros resultados resaltan la importancia práctica del uso de la pérdida de velocidad dentro de la serie para el control del *grado de esfuerzo* y el volumen de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza.

#### 4.4.4. Conclusiones

Las principales conclusiones del **Estudio I.1** fueron las siguientes:

- Existe una fuerte relación entre el porcentaje de pérdida de VMP producido dentro de la serie y el porcentaje de repeticiones realizado, para todas las intensidades relativas comprendidas entre 50 - 85% 1RM, en el ejercicio de press de banca.
- Ante unas mismas pérdidas de velocidad en la serie, el porcentaje de repeticiones realizado es muy similar para las intensidades relativas comprendidas entre el 50 y el 70% de 1RM. Pero ante estas mismas pérdidas de velocidad, el porcentaje de repeticiones realizado aumenta en un 2.5, 5, y 10% ante las intensidades relativas del 75, 80 y 85% 1RM, respectivamente.
- El número de repeticiones realizado durante una serie hasta el fallo muscular ante diferentes intensidades relativas (50 - 85% 1RM) presentó una alta variabilidad inter-sujeto.
- No se observó ninguna relación relevante entre el número de repeticiones realizado durante una serie hasta el fallo muscular y las variables mecánicas y antropométricas analizadas en el presente estudio.



#### 4.4.5. Aplicaciones Prácticas

Los resultados del presente estudio contribuyen a mejorar nuestra comprensión sobre la cuantificación, el control y la prescripción del estímulo de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza. Normalmente, los entrenadores o profesionales del acondicionamiento físico prescriben el volumen de entrenamiento en términos de repeticiones por serie. Sin embargo, nuestros resultados indican que el número de repeticiones máximas que puede ser realizado con una intensidad relativa determinada presenta una alta variabilidad entre individuos. Por tanto, si durante un entrenamiento de fuerza dos sujetos tienen que realizar el mismo número de repeticiones por serie, es probable que cada uno de ellos esté experimentando un *grado de esfuerzo* diferente. Esto es debido a que el porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo que pueden completar podría diferir considerablemente entre cada sujeto. Por tanto, los resultados de este estudio sugieren que, en vez de prescribir un número fijo de repeticiones a realizar con una carga determinada, el volumen de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza se debería controlar usando la magnitud de pérdida de velocidad alcanzada dentro de cada serie, ya que ante una misma pérdida de velocidad en la serie el *esfuerzo realizado* (grado de fatiga) por todos los sujetos es muy semejante, aunque el número de repeticiones realizado sea distinto. Por tanto, las dos variables que deberían ser programadas y controladas durante un entrenamiento de fuerza que tiene como objetivo la mejora del rendimiento deportivo son: (1) la VMP de la primera repetición de la serie (la cual está intrínsecamente relacionada con el porcentaje de 1RM usado), y (2) el porcentaje de pérdida de velocidad que debe ser alcanzado durante cada serie de entrenamiento. De acuerdo con este procedimiento de control de la carga de entrenamiento de fuerza basado en la velocidad de ejecución, cada serie de entrenamiento se debería terminar cuando se alcanzara el porcentaje de pérdida de velocidad deseado. Dicha magnitud de pérdida de velocidad debería establecerse previamente en función de varios factores como son el objetivo específico del entrenamiento, momento del ciclo en el que se realiza el entrenamiento, el ejercicio que se vaya a realizar, la experiencia previa del sujeto en el entrenamiento de fuerza y el nivel de fuerza del deportista.





## **4.5. Estudio I.2:**

***Estimación de la fatiga a través de acciones estáticas y dinámicas después de una serie realizada hasta el fallo muscular con una carga del 60% de la RM. Fiabilidad del porcentaje de repeticiones realizado ante distintas pérdidas de velocidad en la serie***





## 4.5. Estudio I.2: Estimación de la fatiga a través de acciones estáticas y dinámicas después de una serie realizada hasta el fallo muscular con una carga del 60% de la RM. Fiabilidad del porcentaje de repeticiones realizado ante distintas pérdidas de velocidad en la serie

### 4.5.1. Metodología

#### A. Tipo de Investigación

El **Estudio I.2** tiene unas características similares al **Estudio I.1**, por tanto, se trata de una investigación *cuantitativa* y fundamentalmente *descriptiva*, aunque podemos considerar la variable *Intensidad Relativa (% 1RM)* como independiente. La investigación es *inferencial* y de carácter fundamentalmente *transversal*.

#### B. Muestra

En este estudio participó un grupo de 28 hombres sanos y físicamente activos (Media  $\pm$  desviación típica: Edad:  $23.5 \pm 2.9$  años; Altura:  $1.77 \pm 0.07$  m; Masa corporal:  $75.5 \pm 8.1$  kg). Todos eran estudiantes del Grado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte con al menos 8 meses de experiencia previa en el entrenamiento de fuerza. Además, estaban familiarizados con el ejercicio de press de banca porque habían participado previamente en algunas evaluaciones y tests con nuestro grupo de trabajo. Tras ser informados del propósito de la investigación y los procedimientos experimentales, todos los participantes dieron su consentimiento por escrito, firmando el documento de Consentimiento Informado (**ANEXO I**), antes de tomar parte en el estudio.

Los requisitos necesarios para participar en este estudio han sido descritos previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.B).

### C. Diseño del Estudio

El presente estudio fue diseñado para (1) analizar la fiabilidad del porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo número de repeticiones que puede ser completado con una carga determinada (60% 1RM), y (2) estimar la fatiga y su recuperación a través de contracciones estáticas y dinámicas, después de una serie realizada hasta el fallo muscular con el 60% 1RM en el ejercicio de press de banca. En las dos semanas anteriores a la realización de los tests se llevaron a cabo 4 sesiones de familiarización (2 sesiones por semana), que consistieron en la realización de varias series de entrenamiento ejecutando cada repetición a la máxima velocidad posible. Durante estas sesiones de familiarización, los participantes eran informados en tiempo real de la velocidad a la que estaban realizando cada repetición. En la última sesión de familiarización, los participantes llevaron a cabo un test isoinercial de cargas progresivas para conocer la relación fuerza/carga - velocidad y la repetición máxima (1RM) en el ejercicio de press de banca. Después de las evaluaciones iniciales, cada participante realizó 2 sesiones separadas por 5-7 días cada una de ellas. En cada sesión, los participantes llevaron a cabo un test de MNR, es decir, hasta el fallo muscular, con el 60% 1RM. La carga relativa para cada participante en cada sesión de test fue determinado a partir de la relación fuerza/carga - velocidad en el ejercicio de press de banca, ya que se ha encontrado que existe una estrecha relación entre el % 1RM y la VMP para este ejercicio (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2014). De este modo, se usó una determinada VMP objetivo ( $\sim 0.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) en las dos sesiones como estimación del 60% 1RM, la cual tenía que ser alcanzada durante la primera o segunda repetición del test de MNR. Para poder ajustar la velocidad de ejecución a la velocidad asociada ( $\pm 0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) con el 60% 1RM, la carga absoluta (kg) se ajustó individualmente para cada participante en cada sesión. Como estimación del grado de fatiga generado por una serie realizada hasta el fallo muscular, y su posterior recuperación, se analizaron distintas variables mecánicas obtenidas de activaciones dinámicas o estáticas (isométricas) realizadas antes (Pre), inmediatamente después (Post 1) y a los 3 (Post 2), 5 (Post 3), 10 (Post 4), 15 (Post 5), 20 (Post 6) minutos después de terminar la serie hasta el fallo muscular. Durante el primer test de MNR se estimó el grado de fatiga y de recuperación a través de activaciones dinámicas, mientras que en el segundo test de MNR, la fatiga se estimó a través de activaciones estáticas (isométricas).

## D. Variables Objeto de Estudio

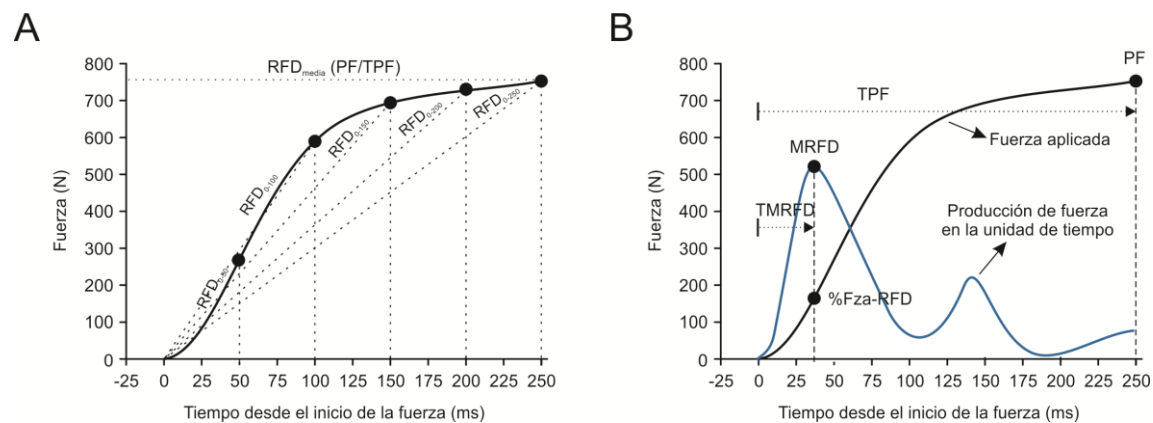
Las principales variables analizadas en el **Estudio I.2** fueron:

- **Fuerza dinámica máxima (1RM), en kg:** Peso máximo con el que un individuo puede realizar una sola repetición.
- **Velocidad de la 1RM ( $VMP_{RM}$ ), en  $m \cdot s^{-1}$ :** VMP a la que se consigue la 1RM.
- **Mejor VMP ( $VMP_{mejor}$ ), en  $m \cdot s^{-1}$ :** Velocidad media propulsiva de la mejor (normalmente la primera) repetición de la serie.
- **Peor VMP ( $VMP_{última}$ ), en  $m \cdot s^{-1}$ :** Velocidad media propulsiva de la última repetición de la serie.
- **Pérdida de velocidad, en (%):** Máxima pérdida de VMP obtenida dentro de cada serie, definida como:  $100 \cdot (VMP_{mejor} - VMP_{última}) / VMP_{mejor}$ .
- **Carga, en kg:** Peso absoluto utilizado en cada test de MNR, en kg.
- **Repeticiones realizadas (Rep):** Máximo número de repeticiones realizadas en cada test de MNR.
- **Velocidad Máxima ( $V_{máx}$ ), en  $m \cdot s^{-1}$ :** Máxima velocidad alcanzada durante la fase concéntrica del movimiento.
- **RFD Máxima (MRFD), en  $N \cdot s^{-1}$ :** Máxima pendiente de la curva fuerza-tiempo tomando los valores de fuerza en intervalos de 50ms.
- **Tiempo en alcanzar la RFD máxima (TMRFD), en ms:** Tiempo transcurrido entre el inicio de la aplicación de fuerza y la MRFD. El inicio de la aplicación de fuerza fue determinado como el punto a partir del cual la fuerza incrementaba de manera progresiva e ininterrumpida.
- **Pico de fuerza (PF), en N:** Máximo valor de fuerza alcanzado durante la contracción estática o dinámica.
- **Tiempo en alcanzar el pico de fuerza (TPF), ms:** Tiempo transcurrido entre el inicio de la aplicación de fuerza y el PF.

- ***RFD media ( $RFD_{media}$ ), en  $N \cdot s^{-1}$*** : Cociente entre el pico de fuerza (estática o dinámica) y el tiempo necesario para alcanzarlo (PF/TPF).
- ***RFD relativa ( $rRFD$ )***: Cociente entre la MRFD y el PF.
- ***Porcentaje de Fuerza aplicada cuando se alcanza la RFD máxima ( $\%F_{za-RFD}$ )***: Porcentaje que representa la fuerza que se está produciendo en el momento en el que se alcanza la MRFD con respecto al PF.
- ***RFD a los 25 ms ( $RFD_{0-25}$ ), en  $N \cdot s^{-1}$*** : Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 25 ms.
- ***RFD a los 50 ms ( $RFD_{0-50}$ ), en  $N \cdot s^{-1}$*** : Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 50 ms.
- ***RFD a los 75 ms ( $RFD_{0-75}$ ), en  $N \cdot s^{-1}$*** : Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 75 ms.
- ***RFD a los 100 ms ( $RFD_{0-100}$ ), en  $N \cdot s^{-1}$*** : Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 100 ms.
- ***RFD a los 200 ms ( $RFD_{0-200}$ ), en  $N \cdot s^{-1}$*** : Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 200 ms.
- ***RFD a los 300 ms ( $RFD_{0-300}$ ), en  $N \cdot s^{-1}$*** : Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 300 ms.
- ***RFD a los 400 ms ( $RFD_{0-400}$ ), en  $N \cdot s^{-1}$*** : Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 400 ms.
- ***RFD a los 500 ms ( $RFD_{0-500}$ ), en  $N \cdot s^{-1}$*** : Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 500 ms.
- ***Cambios producidos durante la recuperación (%)***: Diferencia entre un test, estático o isométrico, y otro realizado posteriormente (ejemplo: Pre - Post 0'; Post 0' - Post 5'; etc.), expresado como porcentaje del valor del test realizado en primer lugar. Esto fue calculado para cada una de las variables analizadas durante los tests estáticos y dinámicos.

- **Estado de pre-tensión, en N:** Cantidad de fuerza ejercida de manera constante antes de realizar la activación isométrica máxima.

Evidentemente, durante los test estáticos, las variables VMP,  $V_{\text{máx}}$  y PP no fueron analizados porque por propia definición, una activación estática, o isométrica, es aquella que se realiza sobre una resistencia insalvable, lo que implica que no hay desplazamiento y por consiguiente no puede existir velocidad ni potencia.



## E. Control de Variables Extrañas

Este apartado ya ha sido descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.E).

## F. Evaluaciones y Pruebas Físicas

### **Análisis antropométrico**

- **Masa corporal** (kg): descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F).
- **Talla** (m): descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F).

### **Pruebas físicas**

- **Test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de press de banca:** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F). La única diferencia con respecto al test descrito anteriormente fue que en el presente estudio se determinó directamente la 1RM. Para ello, cuando la VMP fue inferior a  $0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , la carga fue ajustada con menores incrementos (desde 5 a 1 kg) hasta que se alcanzó la 1RM. Ésta fue considerada como la mayor carga levantada por un participante ejecutando correctamente (rango completo de movimiento) una repetición.
- **Test de máximo número de repeticiones hasta el fallo:** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F). Antes de empezar cada test de MNR, se ajustó la carga propuesta (kg), cuando fue necesario, para que la VMP máxima (normalmente la primera repetición) coincidiera con la VMP correspondiente al 60% 1RM ( $\sim 0.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) (González-Badillo, et al., 2014; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2014).
- **Test con la carga con la que se alcanza una VMP de  $\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $C1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ):** La estimación de la fatiga mecánica dinámica producida por el test de MNR se realizó a través de la pérdida de velocidad, fuerza, RFD y potencia medida ante una carga que se podía desplazar a  $\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  antes de la realización del esfuerzo. Este test se hizo en una máquina Smith (**Figura 1**), en un banco que estaba colocado sobre la plataforma dinamométrica (**Figura 8**). La colocación de los participantes y la ejecución de las repeticiones ya ha sido descrito previamente en el *Test isoinercial*



de cargas progresivas y el *Test de máximo número de repeticiones hasta el fallo*. Antes de comenzar el test, los participantes realizaron un calentamiento estandarizado que consistió en 5 min de movilidad articular de brazos seguido por 2-3 series con cargas progresivas hasta alcanzar la carga con la que se conseguía una VMP de  $\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $\pm 0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Se eligió este valor porque: 1) representa una velocidad relativamente alta, la cual se alcanza con cargas medias ( $\sim 47\%$  1RM) en el ejercicio de press de banca (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010), 2) es una carga que nos permite tener una buena expresión del efecto de un ejercicio de fuerza sobre diferentes variables mecánicas como la velocidad, la fuerza y la RFD (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), y 3) se trata de una carga fácil de mover y que puede ser bien tolerada por los participantes para ser realizada después de un ejercicio fatigante (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Una vez que se determinó la carga, se realizaron dos series (con 3 min de recuperación entre cada una de ellas) de 3 repeticiones. La mejor repetición de cada serie, tomando como criterio la mejor VMP, se tomó para el análisis de la fiabilidad, y la mejor de esas dos se tomó como valor inicial (Pre) para la cuantificación de la fatiga. Este mismo test fue repetido, en las mismas condiciones, inmediatamente después (Post 1) y a los 3 (Post 2), 5 (Post 3), 10 (Post 4), 15 (Post 5), y 20 (Post 6) min después de terminar la serie hasta el fallo muscular (segunda sesión de evaluación). Para la medición Post 1, se necesitó la ayuda de dos colaboradores (uno a cada lado de la barra) que cambiaron el peso de la barra en menos de 10 s.



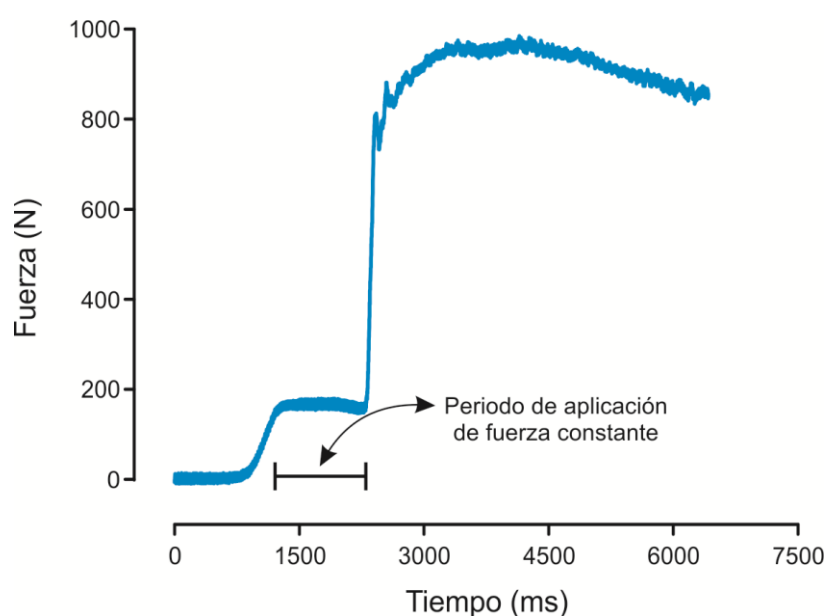
**Figura 8.** Colocación del banco sobre la plataforma dinamométrica para la realización de las evaluaciones de press de banca.

- **Test de fuerza isométrica máxima:** Este test consiste en realizar una activación voluntaria máxima del tren superior, principalmente de los pectorales, tríceps y hombros, contra una resistencia insalvable. Con este test analizamos la fuerza isométrica máxima voluntaria y la curva fuerza-tiempo. Este test se hizo en una máquina Smith (**Figura 1**), en un banco que estaba colocado sobre la plataforma dinamométrica (**Figura 8**). Para su realización, los sujetos se situaban en decúbito supino con la espalda y los glúteos apoyados sobre el banco, al igual que los pies, sujetando la barra con una empuñadura prona, estando ésta situada a ~1cm del pecho. Se utilizaron unos soportes móviles regulables en altura para ajustar la distancia de la barra individualmente para cada participante (**Figura 2**). Este test se puede realizar de dos formas diferentes: a) con una activación progresiva hasta llegar al pico máximo de fuerza; b) con una activación muscular muy rápida, tratando de alcanzar la máxima pendiente (MRFD) en la curva fuerza-tiempo. En el primer caso solo se puede tener en cuenta la fuerza isométrica alcanzada. En el segundo, aparte de medir la FIM, se puede e interesa medir los distintos niveles de fuerza alcanzados en relación con el tiempo. Dado que uno de nuestros principales objetivos es analizar la RFD, elegimos la segunda opción para todos los test

isométricos realizados. Por otro lado, aunque la instrucción que se proporciona al sujeto puede tener importancia, puesto que se ha observado que la máxima producción de fuerza por unidad de tiempo es menor si se le dice al sujeto que haga la contracción "*a la mayor velocidad posible*" que si se le dice que lo haga "*lo más fuerte posible*" (Holtermann, et al., 2007; Sahaly, Vandewalle, Driss, & Monod, 2001), nosotros optamos por la opción *lo más fuerte y rápido posible*. Esperábamos que esta instrucción sirviera para expresar de la manera más completa tanto la fuerza máxima como la producción de fuerza por unidad de tiempo. Antes de comenzar el test, los participantes realizaron un calentamiento estandarizado que consistió en 1 serie de 5 repeticiones a una velocidad de  $\sim 0.95 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y 5 repeticiones a una velocidad de  $\sim 0.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  [aproximadamente el 50% y 60% de 1RM, respectivamente (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010)]. Posteriormente, se colocó la barra en la distancia adecuada y se realizaron 2 pruebas de activación isométrica al 80% - 90% del máximo. Después de 5 min de descanso comenzó el test. Para la realización de este test se necesitó el apoyo de dos colaboradores (uno a cada lado de la barra) que ayudaron a mantener la barra *fija* sobre los soportes laterales para asegurarnos de que los participantes no desplazaban la carga (**Figura 9**). El tiempo de activación máxima fue de  $\sim 5$  s. Antes de iniciar la activación máxima, los participantes debían estar ejerciendo una fuerza estable equivalente a  $\sim 200$  N durante unos 2 s (**Figura 10**). La aplicación de esta fuerza previa es necesaria para evitar picos de fuerza iniciales que produzca *ruidos* en la medición e invaliden los datos de los primeros 100-150 ms. A pesar de todo, es difícil determinar el comienzo exacto de la aplicación de fuerza, así como cuándo se alcanza el primer pico máximo de fuerza. Cada participante realizó 2 activaciones isométricas máximas (con 5 min de recuperación entre ellas) antes del test de MNR para el análisis de la fiabilidad de las variables. Se tomó la mejor repetición, tomando como criterio la de mayor pico de fuerza máximo, como valor inicial (Pre) para la cuantificación de la fatiga. Este mismo test fue repetido, en las mismas condiciones, inmediatamente después (Post 1) y a los 3 (Post 2), 5 (Post 3), 10 (Post 4), 15 (Post 5), 20 (Post 6) min después de terminar la serie hasta el fallo muscular (tercera sesión de evaluación).



**Figura 9.** Representación gráfica de la ejecución del test de fuerza isométrica máxima en el ejercicio de press de banca.



**Figura 10.** Curva fuerza-tiempo de un sujeto representativo del Estudio I.2 durante una activación estática en la que se puede apreciar la aplicación de fuerza (~200 N) previa a la activación máxima.

## G. Instrumental de Evaluación

### *Máquina tipo Smith*

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.G).

### *Transductor lineal de velocidad*

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.G).

### *Plataforma dinamométrica*

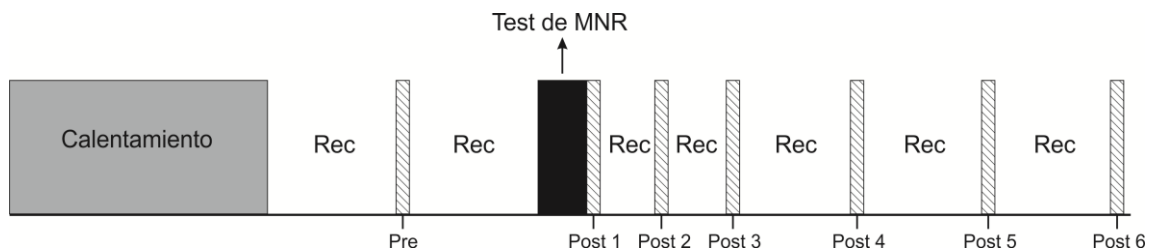
Para la medida directa de la fuerza aplicada se empleó una plataforma dinamométrica FP-500 (Ergotech, Murcia, España) de dimensiones 75 x 60 x 10.5 cm construida con 4 células de carga (de 300 kg, clase de precisión 3000, error total, 0.17 %) y cuya señal es integrada por una caja de sumas en una sola señal que es procesada por un amplificador de ganancia variable y ajustada a un rango de voltaje proporcional a la fuerza que se ejerce sobre la plataforma (en relación 60 kg/V) (**Figura 11**). Las señales de voltaje generadas por el transductor lineal de velocidad T-FORCE System y la plataforma dinamométrica son registradas por una tarjeta de adquisición de datos (USB 1408FS de Measurement Computing, con 4 entradas analógicas de 14 bits de resolución) de forma sincronizada en tiempo real. Ambas señales de velocidad y fuerza se muestrean a una frecuencia de 1000 Hz. Esta tarjeta es controlada mediante el software T-Force Dynamic Measurement System (Ergotech, Murcia, España). A partir del valor instantáneo de velocidad (V) obtenido por el transductor, y del valor de fuerza (F) obtenida por la plataforma dinamométrica, el resto de parámetros cinemáticos y dinámicos son calculados por el software de la siguiente manera: el desplazamiento (x) se obtiene de la integral de los valores de V con respecto al tiempo; la aceleración instantánea (a) resulta derivando la V con respecto al tiempo. La potencia mecánica se calculará como el resultado del producto de las medidas directas de fuerza y velocidad instantáneas. Tanto el transductor lineal de velocidad como la plataforma dinamométrica han sido calibrados en el laboratorio de medida de la empresa Ergotech Consulting, S.L. para garantizar que las medidas que proporcionan son correctas.



**Figura 11.** Plataforma dinamométrica para la evaluación de la fuerza.

## H. Plan de trabajo

Cada participante realizó un total de 3 sesiones de evaluación (un test de cargas progresivas y 2 tests de MNR con el 60% 1RM) separadas por 5-7 días. Se establecieron 8 turnos (10:00 h, 11:00 h, 12:00 h, 13:00 h, 16:00 h, 17:00 h, 18:00 h y 19:00 h) durante cada día para que los participantes pudieran elegir la hora a la que realizar los esfuerzos. Después de la primera sesión de evaluación, se prestó especial atención a que los participantes realizaran los dos tests de MNR a la misma hora ( $\pm 1h$ ) para intentar eliminar posibles variables contaminantes. Para poder controlar adecuadamente las sesiones de evaluación, el número máximo de participantes en cada turno fue de 2. Cada sesión tuvo una duración aproximada de 35-40 min. En la **Figura 12** aparece una representación del protocolo seguido durante las dos sesiones de evaluación de la fatiga. La duración máxima del estudio, incluyendo las sesiones de familiarización, fue de 4 semanas.



**Figura 12.** Protocolo llevado a cabo en las sesiones en las que se evaluaba la fatiga durante y después (tests dinámico y test isométricos) de una serie realizada hasta el fallo muscular con el 60% 1RM.

## I. Análisis estadístico

La media y la desviación típica (DT) se calculó a través de métodos estadísticos estandarizados. Para comprobar la normalidad de la distribución en cada una de las variables se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk. Se usó una prueba *t* de *Student* para muestras relacionadas para detectar las diferencias en el porcentaje de repeticiones realizadas con respecto al máximo número posible entre los dos tests de MNR para cada porcentaje de pérdida de velocidad incurrido en la serie. La fiabilidad relativa fue analizada a través del coeficiente de correlación intraclase (CCI), el cual se calculó utilizando el modelo de un factor con efectos aleatorios y un intervalo de confianza del 95%. Este modelo es el más exigente, ya que tiene en consideración las diferencias entre las medias de las puntuaciones. La fiabilidad absoluta se calculó usando el error estándar de medida ( $SEM = \sqrt{\text{Media Cuadrática de Error}}$ ). Los valores de SEM fueron expresados como porcentaje de sus respectivas medias a través del CV (Atkinson & Nevill, 1998). En relación con estudios previos (Augustsson et al., 2006; Cormack, Newton, McGuigan, & Doyle, 2008; Currell & Jeukendrup, 2008), se determinó que una variable se considera fiable cuando el CV es inferior a 10%.

Se utilizó una prueba ANOVA de medidas repetidas para analizar los cambios en las variables obtenidas durante los tests (isométricos o dinámicos) realizados antes (Pre) y después (Post 1, 2, 3, 4, 5, 6) del test de MNR con el 60% 1RM. Las diferencias en el porcentaje de cambio entre las variables medidas a través de las activaciones estáticas y dinámicas fueron analizadas a través de una prueba ANOVA factorial 2x6 con medidas repetidas con un factor entre grupos (dinámico vs. estático) y un factor intra-grupo (Post 1 vs. Post 2 vs. Post 3 vs. Post 4 vs. Post 5 vs. Post 6). Se aplicó el test de Bonferroni para el ajuste de las medidas repetidas y como test *post-hoc* para detectar las diferencias entre las medias. El nivel de significación estadístico se fijó en el 5% ( $P \leq 0.05$ ). Todos los análisis fueron realizados utilizando el paquete de software estadístico SPSS versión 17.0 (SPSS, Chicago, IL).





## 4.5.2. Resultados

### Test de máximo número de repeticiones

En las **Tablas 6 y 7** aparece un resumen de las principales variables analizadas durante cada test de MNR, y la variabilidad del porcentaje de repeticiones obtenido ante cada pérdida de velocidad en la serie, respectivamente. No se observaron diferencias significativas en ninguna de las variables mecánicas evaluadas entre el test de MNR 1 y el test de MNR 2 (**Tabla 6**).

**Tabla 6.** Variables descriptivas de las dos series realizadas hasta el fallo muscular con el 60% 1RM.

	VMP <sub>mejor</sub> (m·s <sup>-1</sup> )	VMP <sub>última</sub> (m·s <sup>-1</sup> )	PV (%)	Rep	Carga (kg)
<b>Test de MNR 1</b>	0.80 ± 0.01 (0.77 - 0.81)	0.14 ± 0.04 (0.07 - 0.22)	81.4 ± 5.3 (71.3 - 90.9)	17.6 ± 3.7 (11 - 25)	49.7 ± 10.5 (28 - 67)
<b>Test de MNR 2</b>	0.79 ± 0.01 (0.77 - 0.81)	0.14 ± 0.05 (0.07 - 0.23)	81.8 ± 5.7 (73.5 - 91.1)	17.6 ± 3.2 (11 - 25)	49.3 ± 10.7 (27 - 67)

Los datos son medias ± DT (rango).

Test de MNR: Test de máximo número de repeticiones posibles; 1RM: Una repetición máxima; PV: Pérdida de velocidad; Rep: número de repeticiones completadas en la serie; VMP<sub>mejor</sub>: Velocidad media propulsiva de la repetición más rápida de la serie (normalmente la primera repetición); VMP<sub>última</sub>: Velocidad media propulsiva de la última repetición de la serie.

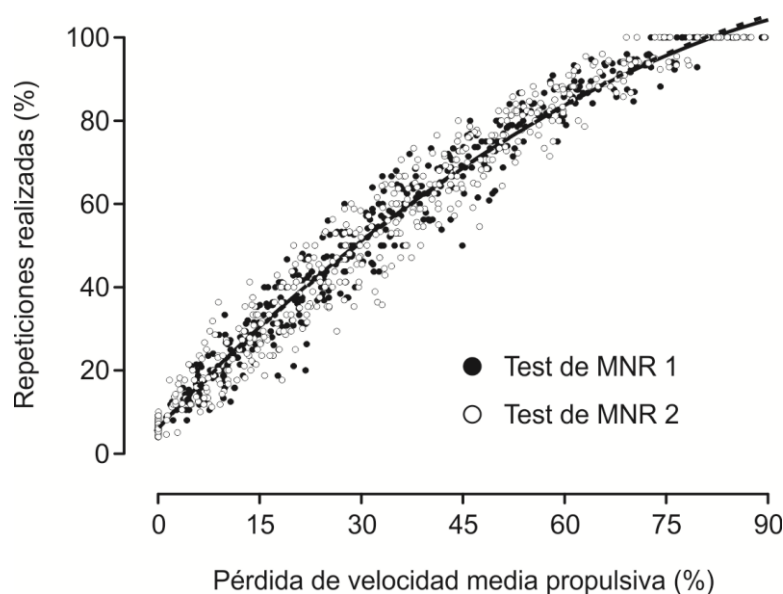
**Tabla 7.** Valores obtenidos de porcentajes de repeticiones realizados y fiabilidad absoluta para cada magnitud de pérdida de VMP alcanzada en la serie hasta el fallo con el 60% 1RM.

PV (%)	Test de MNR 1	Test de MNR 2	CV (%)
<b>15%</b>	29.6 ± 4.6	30.0 ± 3.3	6.6
<b>20%</b>	37.1 ± 5.2	37.4 ± 3.8	6.0
<b>25%</b>	44.2 ± 5.6	44.6 ± 4.2	5.5
<b>30%</b>	51.0 ± 5.8	51.3 ± 4.5	5.1
<b>35%</b>	57.4 ± 5.9	57.8 ± 4.7	4.7
<b>40%</b>	63.5 ± 5.9	63.8 ± 4.7	4.3
<b>45%</b>	69.3 ± 5.8	69.6 ± 4.5	3.8
<b>50%</b>	74.7 ± 5.5	75.0 ± 4.3	3.3
<b>55%</b>	79.8 ± 5.1	80.0 ± 3.9	2.8
<b>60%</b>	84.6 ± 4.6	84.7 ± 3.4	2.4
<b>65%</b>	89.0 ± 4.1	89.1 ± 2.9	2.2
<b>70%</b>	93.1 ± 3.7	93.1 ± 2.6	2.2
<b>75%</b>	96.8 ± 3.5	96.7 ± 2.7	2.1

Los datos son medias ± DT.

PV: Pérdida de velocidad; VMP: Velocidad media propulsiva; Test de MNR: Test de máximo número de repeticiones posibles; CV: Coeficiente de variación.

La prueba *t* de *Student* reveló que no hubo diferencias significativas entre ambos test de MNR en los porcentajes de repeticiones realizados con respecto al máximo posible que se pueden completar para ninguna de las pérdidas de velocidad analizadas (**Tabla 7; Figura 13**). Además, el porcentaje de repeticiones realizado mostró una alta fiabilidad absoluta (CV: 2.1 - 6.6%), con menores valores de CV a medida que incrementaba la pérdida de velocidad alcanzada en la serie (**Tabla 7**).



**Figura 13.** Relación entre la magnitud de pérdida de velocidad alcanzada en la serie y el porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo -fallo muscular- número de repeticiones que puede ser completado en ambos test de máximo número de repeticiones posible con el 60% 1RM.

### ***Fiabilidad de las variables analizadas durante los tests dinámicos y estáticos***

En las **Tablas 8 y 9** aparecen los valores absolutos, el CCI (con el intervalo de confianza al 95%) y el CV (%) de cada una de las variables analizadas durante los test dinámicos e isométricos realizados antes de cada test de MNR.

**Tabla 8.** Fiabilidad de las variables mecánicas analizadas durante los test dinámicos.

Variable	Intento 1	Intento 2	CCI (95% IC)	CV (%)
VMP (m·s <sup>-1</sup> )	0.99 ± 0.03	1.00 ± 0.04	0.780 (0.528 - 0.898)	2.1
V <sub>máx</sub> (m·s <sup>-1</sup> )	1.65 ± 0.09	1.65 ± 0.10	0.887 (0.759 - 0.948)	2.6
PP (W)	831.5 ± 170.6	819.7 ± 177.1	0.970 (0.936 - 0.986)	5.1
PF (N)	713.4 ± 155.9	711.4 ± 153.8	0.993 (0.985 - 0.997)	2.6
TPF (ms)	94.9 ± 23.3	93.0 ± 22.4	0.717 (0.395 - 0.868)	16.1
MRFD (N·s <sup>-1</sup> )	5134.3 ± 1513.1	5125.8 ± 1537.6	0.992 (0.983 - 0.996)	3.8
TMRFD (ms)	21.3 ± 8.9	21.0 ± 7.4	0.639 (0.227 - 0.832)	28.0
RFD <sub>media</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	7941.0 ± 2563.2	8106.5 ± 2692.7	0.915 (0.817 - 0.960)	13.0
rRFD	7.2 ± 1.1	7.2 ± 1.1	0.950 (0.894 - 0.977)	4.7
%PF-RFD	59.1 ± 3.9	59.1 ± 4.0	0.788 (0.547 - 0.902)	3.9
RFD <sub>0-25</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	2143.9 ± 967.7	1972.4 ± 840.3	0.767 (0.502 - 0.892)	27.1
RFD <sub>0-50</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	3801.2 ± 1380.5	3778.2 ± 1391.8	0.946 (0.884 - 0.975)	11.7
RFD <sub>0-75</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	3871.1 ± 1204.5	3863.4 ± 1187.9	0.983 (0.963 - 0.992)	5.7
RFD <sub>0-100</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	3912.3 ± 1043.7	3881.8 ± 1019.1	0.966 (0.928 - 0.984)	6.8

VMP: Velocidad media propulsiva; V<sub>máx</sub>: Velocidad máxima; PP: Pico máximo de potencia; PF: Pico máximo de fuerza; TPF: Tiempo en alcanzar el PF; MRFD: máxima producción de fuerza en la unidad de tiempo; TMRFD: Tiempo en alcanzar la MRFD; RFD<sub>media</sub>: RFD media; rRFD: MRFD relativa al PF; %PF-RFD: Porcentaje de fuerza aplicada cuando se alcanza la MRFD; RFD<sub>0-25</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–25 ms; RFD<sub>0-50</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–50 ms; RFD<sub>0-75</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–75 ms; RFD<sub>0-100</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–100 ms.

**Tabla 9.** Fiabilidad de las variables mecánicas analizadas durante los test estáticos.

Variable	Intento 1	Intento 2	CCI (95% IC)	CV (%)
PF (N)	941.2 ± 192.2	944.4 ± 202.7	0.994 (0.986 - 0.997)	2.3
TPF (ms)	1314.2 ± 588.7	1306.1 ± 575.1	0.949 (0.888 - 0.977)	13.4
MRFD (N·s <sup>-1</sup> )	6708.3 ± 2065.7	6828.9 ± 2005.0	0.992 (0.983 - 0.997)	3.7
TMRFD (ms)	37.8 ± 16.2	37.1 ± 15.4	0.963 (0.918 - 0.983)	11.8
RFD <sub>media</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	899.7 ± 551.9	881.8 ± 478.5	0.978 (0.951 - 0.990)	12.4
rRFD	7.1 ± 1.9	7.3 ± 1.8	0.987 (0.971 - 0.994)	4.1
%PF-RFD	27.0 ± 6.0	27.5 ± 7.2	0.920 (0.823 - 0.964)	8.9
RFD <sub>0-25</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	1286.7 ± 1672.2	1362.9 ± 1723.5	0.957 (0.905 - 0.980)	37.0
RFD <sub>0-50</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	3216.3 ± 2385.0	3526.6 ± 2221.3	0.943 (0.873 - 0.974)	23.8
RFD <sub>0-75</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	4027.7 ± 2294.9	4498.0 ± 2177.7	0.948 (0.886 - 0.977)	17.6
RFD <sub>0-100</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	4444.6 ± 1523.1	4573.7 ± 1392.7	0.957 (0.906 - 0.981)	9.3
RFD <sub>0-200</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	2982.8 ± 671.4	2963.1 ± 674.9	0.985 (0.967 - 0.993)	3.8
RFD <sub>0-300</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	2145.5 ± 446.8	2111.4 ± 443.2	0.989 (0.975 - 0.995)	3.1
RFD <sub>0-400</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	1671.7 ± 342.5	1661.5 ± 361.9	0.985 (0.966 - 0.993)	3.6
RFD <sub>0-500</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	1381.2 ± 288.9	1370.1 ± 293.5	0.992 (0.983 - 0.997)	2.6

PF: Pico máximo de fuerza; TPF: Tiempo en alcanzar el PF; MRFD: máxima producción de fuerza en la unidad de tiempo; TMRFD: Tiempo en alcanzar la MRFD; RFD<sub>media</sub>: RFD media; rRFD: MRFD relativa al PF; %PF-RFD: Porcentaje de fuerza aplicada cuando se alcanza la MRFD; RFD<sub>0-25</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–25 ms; RFD<sub>0-50</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–50 ms; RFD<sub>0-75</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–75 ms; RFD<sub>0-100</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–100 ms; RFD<sub>0-200</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–200 ms; RFD<sub>0-300</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–300 ms; RFD<sub>0-400</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–400 ms; RFD<sub>0-500</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–500 ms.

En general, todas las variables analizadas mostraron una alta fiabilidad absoluta y relativa en ambos tipos de test, excepto las variables TPF, TMRFD,  $RFD_{media}$ ,  $RFD_{0-25}$  y  $RFD_{0-50}$ . También se puede observar cómo las variables medidas durante los tests estáticos tienden a mostrar mayores valores de CCI y menores valores de CV que las variables obtenidas de los tests dinámicos.

### ***Estimación de la fatiga a través de tests dinámicos y estáticos***

Los valores alcanzados en cada una de las variables medidas durante los test dinámicos concéntricos muestran un cambio en sentido negativo entre el Pre y el Post 1, siendo éstos cambios estadísticamente significativos en todas las variables excepto para el TPF y el TMRFD. El test ANOVA de medidas repetidas también indicó que ninguna de las variables analizadas recuperó los valores pre-fatiga después de 20 min de recuperación (**Tabla 10**). Las variables que menor grado de recuperación mostraron fueron el PP, la MRFD, la  $RFD_{0-25}$  y  $RFD_{0-50}$ . La mayoría de las variables alcanzaron su mayor grado de recuperación a los 5 - 10 min después de la serie hasta el fallo, y mantuvieron sus valores en los siguientes intervalos de tiempo evaluados. Cada variable mostró un porcentaje de cambio y de recuperación diferente en cada uno de los intervalos de tiempo evaluados.

Los resultados de las variables medidas durante los tests isométricos realizados antes, inmediatamente después y a los 3, 5, 10, 15 y 20 min después de la realización del test de MNR están expuestos en la **Tabla 11**. El promedio del estado de pre-tensión inicial antes de la activación máxima fue similar para todos los test isométricos realizados en los diferentes intervalos de tiempo. El análisis de los datos mostró un empeoramiento significativo de todas las variables, excepto del TPF, entre el Pre y el Post 1. Las variables PF y  $RFD_{media}$  recuperaron los valores iniciales después de 20 min, mientras que el resto de variables no alcanzó los valores pre-fatiga tras la recuperación. Al igual que en los test dinámicos, el mayor grado de recuperación se produjo en los primeros 5-10 min post esfuerzo. El grado de pérdida y de recuperación fue diferente para cada una de las variables analizadas (**Tabla 11**).

**Tabla 10.** Valores medios obtenidos para cada una de las variables medidas durante las **activaciones dinámicas** antes, inmediatamente después y a los 3, 5, 10, 15, 20 min después de terminar la serie hasta el fallo con el 60% 1RM.

Variable	Pre	Post 1	Post 2	Post 3	Post 4	Post 5	Post 6
VMP ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1.01 $\pm$ 0.03 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	0.42 $\pm$ 0.07	0.76 $\pm$ 0.08 <sup>a</sup>	0.84 $\pm$ 0.08 <sup>a,b</sup>	0.90 $\pm$ 0.07 <sup>a,b,c</sup>	0.90 $\pm$ 0.06 <sup>a,b,c</sup>	0.90 $\pm$ 0.07 <sup>a,b,c</sup>
V <sub>máx</sub> ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1.67 $\pm$ 0.09 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	0.68 $\pm$ 0.14	1.17 $\pm$ 0.15 <sup>a</sup>	1.32 $\pm$ 0.16 <sup>a,b</sup>	1.42 $\pm$ 0.17 <sup>a,b,c</sup>	1.43 $\pm$ 0.17 <sup>a,b,c</sup>	1.45 $\pm$ 0.16 <sup>a,b,c</sup>
PP (W)	838.1 $\pm$ 176.9 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	284.7 $\pm$ 87.0	541.5 $\pm$ 145.0 <sup>a</sup>	628.7 $\pm$ 170.4 <sup>a,b</sup>	680.7 $\pm$ 183.5 <sup>a,b,c</sup>	691.8 $\pm$ 183.2 <sup>a,b,c</sup>	693.3 $\pm$ 183.2 <sup>a,b,c</sup>
PF (N)	715.2 $\pm$ 153.2 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	508.4 $\pm$ 121.8	627.1 $\pm$ 149.4 <sup>a</sup>	663.2 $\pm$ 157.6 <sup>a,b</sup>	671.5 $\pm$ 159.9 <sup>a,b</sup>	682.4 $\pm$ 154.4 <sup>a,b</sup>	676.8 $\pm$ 155.9 <sup>a,b</sup>
TPF (ms)	95.8 $\pm$ 22.8 <sup>c</sup>	98.3 $\pm$ 19.1	98.5 $\pm$ 18.4	112.9 $\pm$ 25.9	107.3 $\pm$ 21.9	105.2 $\pm$ 19.1	108.2 $\pm$ 24.5
MRFD ( $\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$ )	5141.2 $\pm$ 1516.9 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	1756.2 $\pm$ 901.9	3629.5 $\pm$ 1297.2 <sup>a</sup>	3915.1 $\pm$ 1280.9 <sup>a</sup>	4207.3 $\pm$ 1437.9 <sup>a,b</sup>	4259.4 $\pm$ 1349.3 <sup>a,b</sup>	4313.9 $\pm$ 1539.8 <sup>a,b,c</sup>
TMRFD (ms)	22.1 $\pm$ 8.2 <sup>d</sup>	28.1 $\pm$ 15.4	29.3 $\pm$ 9.4	28.7 $\pm$ 11.1	30.4 $\pm$ 11.3	24.8 $\pm$ 11.5	29.1 $\pm$ 10.3
RFD <sub>media</sub> ( $\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$ )	7902.7 $\pm$ 2642.7 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	5307.4 $\pm$ 1485.6	6554.1 $\pm$ 1951.6 <sup>a</sup>	6274.7 $\pm$ 2379.7	6631.1 $\pm$ 2311.0 <sup>a</sup>	6834.9 $\pm$ 2327.8 <sup>a</sup>	6662.5 $\pm$ 2277.6 <sup>a</sup>
rRFD	7.1 $\pm$ 1.1 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	3.3 $\pm$ 1.1	5.7 $\pm$ 1.0 <sup>a</sup>	5.8 $\pm$ 0.9 <sup>a</sup>	6.1 $\pm$ 1.0 <sup>a,b</sup>	6.2 $\pm$ 1.0 <sup>a</sup>	6.2 $\pm$ 1.2 <sup>a</sup>
%PF-RFD	59.3 $\pm$ 3.9 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	80.9 $\pm$ 6.0	67.7 $\pm$ 4.4 <sup>a</sup>	65.0 $\pm$ 4.3 <sup>a</sup>	64.2 $\pm$ 4.8 <sup>a,b</sup>	62.6 $\pm$ 4.3 <sup>a,b</sup>	63.5 $\pm$ 4.7 <sup>a,b</sup>
RFD <sub>0-25</sub> ( $\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$ )	2059.2 $\pm$ 910.1 <sup>a,b,c</sup>	846.5 $\pm$ 462.9	1208.2 $\pm$ 555.8 <sup>a</sup>	1309.0 $\pm$ 589.8 <sup>a</sup>	1433.1 $\pm$ 722.3 <sup>a</sup>	1589.7 $\pm$ 707.1 <sup>a</sup>	1401.5 $\pm$ 728.5 <sup>a</sup>
RFD <sub>0-50</sub> ( $\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$ )	3772.2 $\pm$ 1399.9 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	1250.5 $\pm$ 694.7	2251.3 $\pm$ 1001.0 <sup>a</sup>	2544.3 $\pm$ 1085.8 <sup>a</sup>	2646.7 $\pm$ 1212.1 <sup>a</sup>	2890.0 $\pm$ 1117.1 <sup>a</sup>	2727.1 $\pm$ 1327.1 <sup>a</sup>
RFD <sub>0-75</sub> ( $\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$ )	3883.9 $\pm$ 1188.3 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	1344.7 $\pm$ 727.8	2668.3 $\pm$ 993.3 <sup>a</sup>	2906.6 $\pm$ 981.6 <sup>a</sup>	3161.7 $\pm$ 1160.3 <sup>a</sup>	3216.1 $\pm$ 1086.0 <sup>a,b</sup>	3196.4 $\pm$ 1199.4 <sup>a,b</sup>
RFD <sub>0-100</sub> ( $\text{N}\cdot\text{s}^{-1}$ )	3979.8 $\pm$ 1023.5 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	1499.5 $\pm$ 754.0	2953.9 $\pm$ 993.1 <sup>a</sup>	3060.1 $\pm$ 1365.9 <sup>a</sup>	3537.2 $\pm$ 1166.7 <sup>a,b</sup>	3534.4 $\pm$ 1093.6 <sup>a,b</sup>	3543.1 $\pm$ 1121.0 <sup>a,b</sup>

VMP: Velocidad media propulsiva; V<sub>máx</sub>: Velocidad máxima; PP: Pico máximo de potencia; PF: Pico máximo de fuerza; TPF: Tiempo en alcanzar el PF; MRFD: máxima producción de fuerza en la unidad de tiempo; TMRFD: Tiempo en alcanzar la MRFD; RFD<sub>media</sub>: RFD media; rRFD: MRFD relativa al PF; %PF-RFD: Porcentaje de fuerza aplicada cuando se alcanza la MRFD; RFD<sub>0-25</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–25 ms; RFD<sub>0-50</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–50 ms; RFD<sub>0-75</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–75 ms; RFD<sub>0-100</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–100 ms.

Diferencias significativas con respecto a: <sup>a</sup> Post 1; <sup>b</sup> Post 2; <sup>c</sup> Post 3; <sup>d</sup> Post 4; <sup>e</sup> Post 5; <sup>f</sup> Post 6.

**Tabla 11.** Valores medios obtenidos para cada una de las variables medidas durante las **activaciones estáticas** antes, inmediatamente después y a los 3, 5, 10, 15, 20 min después de terminar la serie hasta el fallo con el 60% 1RM.

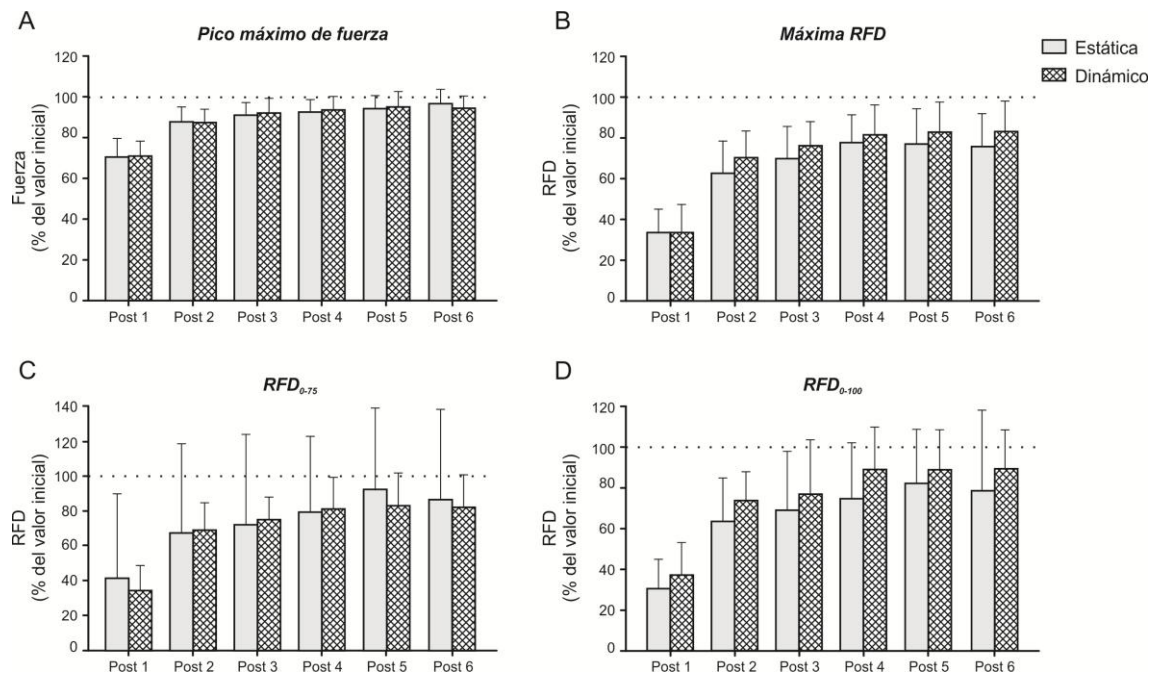
Variable	Pre	Post 1	Post 2	Post 3	Post 4	Post 5	Post 6
PF (N)	957.3 ± 197.6 <sup>a,b,c,d,e</sup>	671.5 ± 155.9	835.8 ± 174.0 <sup>a</sup>	866.2 ± 170.4 <sup>a</sup>	884.2 ± 191.4 <sup>a,b</sup>	897.6 ± 180.5 <sup>a,b</sup>	921.9 ± 193.0 <sup>a,b,c,d</sup>
TPF (ms)	1363.9 ± 555.3 <sup>b</sup>	1528.4 ± 736.1	2153.5 ± 946.8	1823.0 ± 875.6	1666.7 ± 987.3	1798.4 ± 998.2	1779.1 ± 977.9
MRFD	6668.3 ± 1912.7 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	2229.4 ± 984.4	4241.6 ± 1642.2 <sup>a</sup>	4742.2 ± 1808.0 <sup>a</sup>	5219.4 ± 1831.9 <sup>a,b</sup>	5246.2 ± 2055.5 <sup>a,b</sup>	5186.6 ± 2060.8 <sup>a,b</sup>
TMRFD (ms)	39.8 ± 18.3 <sup>a,b,c,f</sup>	86.3 ± 64.0	58.9 ± 32.0	63.8 ± 42.9	65.9 ± 87.5	48.0 ± 24.8	66.0 ± 40.3
RFD <sub>media</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	854.0 ± 492.1 <sup>a</sup>	582.4 ± 432.1	568.8 ± 584.9	679.8 ± 608.3	913.9 ± 1104.2	971.6 ± 1290.7	772.8 ± 1056.9
rRFD	7.0 ± 1.7 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	3.3 ± 1.3	5.1 ± 1.8 <sup>a</sup>	5.4 ± 1.9 <sup>a</sup>	5.9 ± 1.9 <sup>a</sup>	5.9 ± 2.1 <sup>a</sup>	5.7 ± 2.0 <sup>a</sup>
%PF-RFD	27.7 ± 6.6 <sup>a</sup>	39.6 ± 10.5	31.2 ± 6.3 <sup>a</sup>	32.2 ± 6.1	30.7 ± 7.3 <sup>a</sup>	30.9 ± 6.0 <sup>a</sup>	32.3 ± 8.6
RFD <sub>0-25</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	1679.9 ± 1106.0 <sup>a,b</sup>	754.7 ± 452.3	934.0 ± 596.3	1069.9 ± 1024.9	1226.2 ± 852.1	1301.4 ± 901.8	1128.4 ± 806.4
RFD <sub>0-50</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	3476.0 ± 2091.3 <sup>a,b,c,f</sup>	1042.5 ± 603.1	1741.9 ± 1080.4 <sup>a</sup>	1902.3 ± 1276.9 <sup>a</sup>	2605.0 ± 1809.0 <sup>a</sup>	2613.9 ± 1616.5 <sup>a</sup>	2318.0 ± 1703.9 <sup>a</sup>
RFD <sub>0-75</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	4298.9 ± 2066.8 <sup>a,b,c,f</sup>	1283.7 ± 677.2	2495.8 ± 1243.5 <sup>a</sup>	2698.7 ± 1487.4 <sup>a</sup>	3355.3 ± 1888.6 <sup>a</sup>	3475.6 ± 1769.8 <sup>a</sup>	3153.7 ± 1936.7 <sup>a</sup>
RFD <sub>0-100</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	4473.3 ± 1470.0 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	1384.3 ± 754.9	2686.5 ± 1206.5 <sup>a</sup>	2913.5 ± 1435.8 <sup>a</sup>	3284.9 ± 1628.4 <sup>a</sup>	3476.2 ± 1471.1 <sup>a,b</sup>	3323.2 ± 2037.3 <sup>a</sup>
RFD <sub>0-200</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	2961.9 ± 671.9 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	1385.4 ± 557.2	2255.2 ± 679.5 <sup>a</sup>	2361.0 ± 720.9 <sup>a</sup>	2497.4 ± 807.9 <sup>a</sup>	2556.8 ± 717.3 <sup>a,b</sup>	2518.4 ± 842.9 <sup>a</sup>
RFD <sub>0-300</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	2139.0 ± 447.7 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	1149.8 ± 385.3	1699.2 ± 480.8 <sup>a</sup>	1778.9 ± 475.6 <sup>a</sup>	1838.3 ± 534.1 <sup>a</sup>	1862.2 ± 467.7 <sup>a,b</sup>	1853.5 ± 523.9 <sup>a</sup>
RFD <sub>0-400</sub> (N·s <sup>-1</sup> )	1679.7 ± 355.2 <sup>a,b,c,d,e,f</sup>	954.0 ± 283.5	1353.3 ± 359.5 <sup>a</sup>	1403.1 ± 361.8 <sup>a</sup>	1447.3 ± 430.4 <sup>a</sup>	1450.2 ± 371.8 <sup>a</sup>	1456.5 ± 391.4 <sup>a</sup>

PF: Pico máximo de fuerza; TPF: Tiempo en alcanzar el PF; MRFD: máxima producción de fuerza en la unidad de tiempo; TMRFD: Tiempo en alcanzar la MRFD; RFD<sub>media</sub>: RFD media; rRFD: MRFD relativa al PF; %PF-RFD: Porcentaje de fuerza aplicada cuando se alcanza la MRFD; RFD<sub>0-25</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–25 ms; RFD<sub>0-50</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–50 ms; RFD<sub>0-75</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–75 ms; RFD<sub>0-100</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–100 ms; RFD<sub>0-200</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–200 ms; RFD<sub>0-300</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–300 ms; RFD<sub>0-400</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–400 ms; RFD<sub>0-500</sub>: Pendiente media de la curva fuerza-tiempo en el intervalo de 0–500 ms.

Diferencias significativas con respecto a: <sup>a</sup> Post 1; <sup>b</sup> Post 2; <sup>c</sup> Post 3; <sup>d</sup> Post 4; <sup>e</sup> Post 5; <sup>f</sup> Post 6.

### Comparación de la fatiga estimada a través de tests dinámicos y estáticos

No se encontraron diferencias significativas en el porcentaje de pérdida producido por la realización de una serie hasta el fallo con el 60% 1RM en ninguna de las variables comunes medidas durante las activaciones dinámicas y estáticas (PF, TPF, MRFD, TMRFD,  $RFD_{media}$ ,  $rRFD$ , %PF-RFD,  $RFD_{0-25}$ ,  $RFD_{0-50}$ ,  $RFD_{0-75}$ ,  $RFD_{0-100}$ ). En la **Figura 14** se muestran los valores alcanzados, con respecto al valor obtenido en condición sin fatiga, en 4 variables de esas variables (PF, MRFD,  $RFD_{0-75}$ ,  $RFD_{0-100}$ ) en cada una de las mediciones post-esfuerzo (desde Post 1 a Post 6).



**Figura 14.** Valores de distintas variables con respecto al valor previo al esfuerzo (100%) tras la realización de una serie hasta el fallo muscular con el 60% 1RM en distintos intervalos de tiempo, desde Post1 a Post 6 (**A**: pico de fuerza máximo; **B**: máxima RFD; **C**: RFD producida en el intervalo de 0-75 ms; **D**: RFD producida en el intervalo de 0-100 ms), medidas durante test dinámicos e isométricos.





### 4.5.3. Discusión

Los resultados del presente estudio revelaron que el porcentaje de repeticiones realizado para cada magnitud de pérdida de VMP estudiado mostró una alta fiabilidad absoluta. Además, la realización de una serie hasta el fallo muscular con el 60% de 1RM produjo un grado de fatiga y de recuperación (estimado a través de los cambios en diferentes variables mecánicas obtenidas de activaciones dinámicas y estáticas, medidas antes y en varios intervalos de tiempo después del test de MNR) diferenciado en función de la variable tomada para estimarla. Sin embargo, los porcentajes de cambio para las variables comunes entre las activaciones dinámicas y estáticas fueron similares en cada uno de los intervalos de tiempo medidos.

#### ***Fiabilidad del porcentaje de repeticiones realizado***

Para nuestro conocimiento, este es el primer estudio en el que se analiza la fiabilidad del porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo número de repeticiones que puede ser completado ante una pérdida de velocidad determinada durante una serie realizada hasta el fallo muscular con el 60% 1RM. En el **Estudio I.1** se comprobó que existe una alta relación entre la pérdida de VMP en la serie y el porcentaje de repeticiones realizado en el ejercicio de press de banca, independientemente de la carga utilizada. Sin embargo, la magnitud del porcentaje de repeticiones realizado ante una pérdida de VMP determinada depende de la magnitud de la carga (% 1RM) utilizada. Por tanto, para analizar la fiabilidad de esta variable es importante controlar la VMP de la primera repetición de la serie (i.e., la intensidad relativa) en todos los intentos realizados para cada individuo. En la **Tabla 6** se puede observar cómo todas las variables que definen las características del test de MNR ( $VMP_{mejor}$ ,  $VMP_{última}$ , pérdida de velocidad, número de repeticiones realizadas y peso utilizado) son similares entre ambos intentos. Una vez confirmado que todos los tests de MNR se realizaron con la misma intensidad relativa [60% 1RM; variación máxima del 2.4% (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010)] y hasta el fallo muscular, los resultados mostraron que la fiabilidad absoluta para el porcentaje de repeticiones realizado ante una pérdida de VMP determinada (desde el 15% al 75%) fue alta, con unos valores de CV que fueron progresivamente menores (desde el 6.6% al 2.1%) a medida que aumentó el porcentaje de pérdida de VMP dentro de la serie (**Tabla 7**). Estos resultados contrastan con la

amplia variabilidad inter-sujeto ( $CV = \sim 20\%$ ) que mostró el número de repeticiones realizado en éste (**Tabla 6**) y en el **Estudio I.1 (Tablas 2 y 3)**, y confirman la necesidad de usar la pérdida de VMP dentro de la serie, en vez de la realización de un número determinado de repeticiones, para controlar el volumen de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza con el fin de igual el *nivel de esfuerzo* realizado por cada individuo.

### ***Estimación de la fatiga a través de tests dinámicos y estáticos***

El segundo objetivo de este estudio fue estimar la fatiga y su recuperación a través del cambio en diferentes variables obtenidas de activaciones estáticas y dinámicas, después de una serie realizada hasta el fallo muscular con el 60% 1RM. Muchos de los estudios que analizan la fatiga neuromuscular después de una o varias series hasta el fallo muscular han utilizado un número determinado de repeticiones máximas (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Ahtiainen, et al., 2003; Babault, Desbrosses, Fabre, Michaut, & Pousson, 2006; Denton & Cronin, 2006; González-Badillo et al., 2016; Izquierdo et al., 2009; Pareja-Blanco et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), basándose en la imprecisa asociación descrita entre el % 1RM y el número medio de repeticiones que se pueden hacer con dicho % 1RM (Brzycki, 1993; Hoeger, Hopkins, Barette, & Hale, 1990; Sakamoto & Sinclair, 2006). Consecuentemente, si todos los participantes ejecutaron un mismo número de repeticiones máximas, es probable que no todos realizaran el test con la misma intensidad relativa, ya que, como se ha comprobado en el **Estudio I.1** de la presente Tesis y en otros artículos (Izquierdo et al., 2006; Sakamoto & Sinclair, 2006; Shimano et al., 2006; Terzis, et al., 2008), ante un porcentaje 1RM determinado, por ejemplo el 60% de 1RM, existe una gran variabilidad en el máximo número de repeticiones que se pueden realizar (i.e., no todos los individuos son capaces de realizar el mismo número de repeticiones). Por tanto, el grado de fatiga mostrado en este tipo de estudios corresponde a un número determinado de repeticiones máximas, no a la realización de un test hasta el fallo muscular ante la misma intensidad relativa. En otros trabajos se programó el esfuerzo realizado para generar fatiga en base al tiempo bajo tensión (Chapman, Newton, Sacco, & Nosaka, 2006; Tran, Docherty, & Behm, 2006) o a un determinado nivel de fuerza isométrica máxima (Cheng & Rice, 2005, 2009). Por tanto, en comparación con otros trabajos en los que se ha analizado la fatiga neuromuscular después de una serie o sesión de

entrenamiento de fuerza, para nuestro conocimiento, éste es el único estudio en el que se comprobó que la *carga propuesta* (kg) se correspondía con la *carga real* (intensidad relativa). Por tanto, el grado de fatiga estimado después de cada test de MNR dependería de factores físicos y fisiológicos propios de cada sujeto, y no de la utilización de una intensidad relativa diferente.

### **A. Estimación de la fatiga a través de tests dinámicos**

Nuestros resultados indican que el test de MNR produjo un cambio significativo en todas las variables evaluadas, excepto en el TPF y TMRFD, entre los valores iniciales (Pre) y los obtenidos inmediatamente después del esfuerzo (Post 1). Aunque ambas variables, el TPF y el TMRFD, mostraron un aumento considerable como consecuencia del grado de fatiga generado durante el test de MNR, el hecho de que no alcanzaran la significatividad estadística se puede deber a la gran variabilidad o dispersión intra-sujeto que exhibieron estas dos variables, lo cual está en relación con la baja fiabilidad absoluta (CV: 16.1% y 18.0% para el TPF y el TMRFD, respectivamente; **Tabla 8**) y relativa (CCI: 0.717 y 0.639 para el TPF y el TMRFD, respectivamente; **Tabla 8**) de ambas variables. Después del descenso inicial, todas las variables experimentan un alto grado de recuperación en los primeros 5 min post-esfuerzo. Esto se puede deber, en parte, a que los procesos de resíntesis de los sustratos energéticos necesarios para la contracción muscular (principalmente ATP y fosfocreatina) se inician inmediatamente después del cese del ejercicio y tienen su mayor tasa de reposición en los primeros minutos post-esfuerzo (Bogdanis, Nevill, Boobis, Lakomy, & Nevill, 1995; Dawson et al., 1997). Sin embargo, además de la depleción de diferentes sustratos energéticos, el uso repetido e intenso de la musculatura produce un deterioro en el funcionamiento de las estructuras neurales y moleculares de las que dependen la contracción muscular (ver apartado **3.2.2. Factores asociados con la fatiga muscular**), los cuales tienen un curso de recuperación más prolongado (Chiu & Salem, 2010; Gorostiaga et al., 2012a; Gorostiaga et al., 2010; Pareja-Blanco, et al., 2016; Warren, Ingalls, Lowe, & Armstrong, 2002). Por este motivo, pasados esos 5 min iniciales post-esfuerzo, el grado de recuperación se ralentiza, no existiendo diferencias significativas entre los valores obtenidos a los 5 (Post 3) y los 20 min (Post 6). Así, ninguna variable alcanzó los valores iniciales durante la recuperación (72 - 89% del valor inicial). Estos resultados

podrían explicar que, después de realizar una serie hasta el fallo muscular, el número de repeticiones que se pueden realizar en series subsiguientes de ejercicio se vea reducido considerablemente (MacDougall et al., 1999; Richmond & Godard, 2004). Aunque algunos estudios han indicado que el tiempo necesario de recuperación después de una serie es corto (1 - 4 min) (Chiu & Salem, 2010), parece que el grado de reducción en el número de repeticiones depende de la intensidad relativa, del tiempo de recuperación entre series y del ejercicio realizado (Willardson & Burkett, 2005, 2006a, 2006b). Durante entrenamientos de fuerza con altas cargas, parece que solo se necesita 1 min de recuperación para intentos sucesivos de 1RM (Matuszak, Fry, Weiss, Ireland, & McKnight, 2003), mientras que para la realización de series de 8RM se requiere un tiempo de recuperación superior a 5 min (Willardson & Burkett, 2005). Estos resultados parecen indicar que cuanto menor es la intensidad del entrenamiento, y como consecuencia, mayor es el número de repeticiones máximas que se pueden realizar, mayor es el tiempo de recuperación que se necesita para poder hacer el mismo número de repeticiones en las series subsiguientes. Esta afirmación está en concordancia con los resultados del presente estudio, ya que después de una serie hasta el fallo con una intensidad relativa del 60% 1RM se necesitan más de 20 min de recuperación para volver a recuperar el estado de rendimiento inicial.

La pérdida de VMP medida a través de activaciones isoinerciales después de una o varias series de entrenamiento hasta el fallo muscular ya ha sido descrita previamente (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). En estos trabajos se analizó precisamente la pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  después de diferentes esfuerzos caracterizados por las repeticiones realizadas en relación con las que se podían realizar con un peso determinado (*Carácter del esfuerzo*). Dichos esfuerzos oscilaron entre 12(12) y 2(4). De todas las series realizadas con un *Carácter del esfuerzo* máximo [i.e., realizadas hasta el fallo muscular: 12(12), 10(10), 8(8), 6(6) y 4(4)], donde mayor grado de pérdida de velocidad con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  se produjo fue en la serie en la que se hacía un mayor número de repeticiones (~32.8 - 44.6%). Estos porcentajes de pérdida de VMP son ligeramente inferiores a los encontrados en el presente estudio. Estas diferencias se deben, posiblemente, a que el número de repeticiones realizado (12 vs. 17) y la pérdida de VMP alcanzada dentro de la serie (~64% vs. ~81%) fueron inferiores en los estudios mencionados anteriormente (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016;

Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) en comparación con el presente estudio. Sin embargo, nuestros resultados parecen estar en concordancia con estos trabajos (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), ya que en ellos se muestra cómo, ante esfuerzos con un *Carácter del esfuerzo* máximo, a medida que aumenta el número de repeticiones realizado dentro de la serie, aumenta la magnitud de pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$ . En algunos de estos estudios (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016), además de medir la pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  inmediatamente después de cada esfuerzo, se analizó el curso de recuperación de esta y otras variables a la 6, 24 y 48 h después la sesión de entrenamiento. Los resultados de estos estudios revelaron que 6 horas después de realizar el esfuerzo correspondiente a 3 series de 12(12), los valores de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  alcanzados eran estadísticamente inferiores (92.9% del valor inicial) a los mostrados en estado de no fatiga. Incluso a las 24 y 48 h post-esfuerzo (94.5% y 95.8% de los valores iniciales, respectivamente), aunque no hubo diferencias estadísticamente significativas, los valores de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  aún no se habían recuperado.

Otros estudios (Cheng & Rice, 2005, 2009) también han analizado la pérdida de velocidad y su recuperación después de activaciones isotónicas. En un primer estudio, Cheng & Rice (2005) analizaron el grado de fatiga producido por la realización de activaciones isotónicas de los extensores de rodilla con una carga que representaba el 50% de la fuerza isométrica máxima hasta que la velocidad era inferior al 65% del valor inicial (i.e., hasta alcanzar una pérdida de velocidad del 35%). Las mediciones post-esfuerzo realizadas revelaron que tanto la velocidad como la potencia se recuperaron a los 3 min de terminar el esfuerzo. Estas discrepancias con nuestro resultados se pueden deber a la diferencia en el *grado de fatiga* inducido durante la serie en cada caso. Mientras que en nuestro estudio los participantes realizaron el máximo número de repeticiones posible, en el de Cheng & Rice (2005) realizaron repeticiones hasta perder solo un ~35% de la velocidad máxima, pérdidas que los participantes de nuestro estudio alcanzaron cuando realizaron aproximadamente el 57% de las repeticiones posibles. Esto hubiera significado haber realizado una media de 10 repeticiones en vez de las 17 que se realizaron. Si, como se ha descrito en otros estudios (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), parece que el grado de fatiga inducido por la realización de una serie aumenta de manera exponencial a partir de la realización de aproximadamente

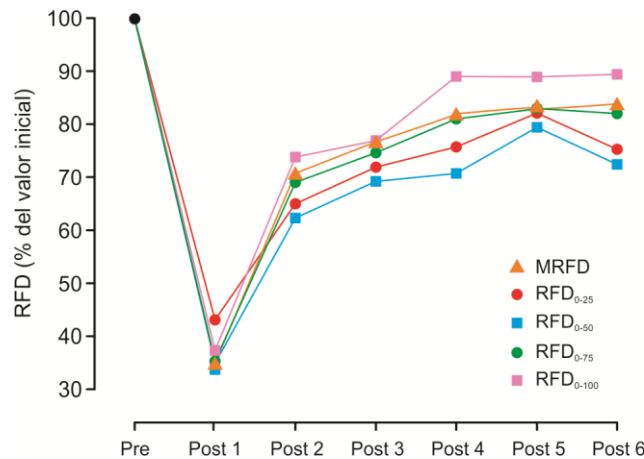
la mitad de las repeticiones posibles, y precisamente estas son las repeticiones que se dejan sin realizar en el estudio de Cheng & Rice (2005), es razonable admitir que los porcentajes de pérdida de velocidad y potencia sean menores y tengan una recuperación más rápida al compararlos con nuestros resultados.

En un estudio posterior, Cheng & Rice (2009) llevaron a cabo un protocolo similar, pero esta vez se realizaron activaciones isotónicas de los flexores dorsales del pie hasta obtener una pérdida de velocidad en la serie del 50% de la velocidad inicial. Aunque se alcanzó una magnitud de pérdida de velocidad de ~65% tras el esfuerzo, después de 5 min de recuperación, los valores de velocidad fueron similares a los obtenidos antes del protocolo de fatiga. Las diferencias con nuestro estudio se pueden deber, además de al hecho de haber alcanzado una menor pérdida de velocidad durante el test de fatiga, al tipo de ejercicio realizado. Así, en base a estos resultados, parece que cuando se realizan ejercicios monoarticulares, localizados, y que involucran grupos musculares pequeños, la recuperación es más rápida que cuando se realizan ejercicios multiarticulares, que involucran mayores grupos musculares.

La pérdida de potencia y su posterior recuperación después de una o varias series de entrenamiento también ha sido analizada en diferentes estudios (Gorostiaga, et al., 2012a; Gorostiaga et al., 2014; Gorostiaga et al., 2012b; Izquierdo et al., 2011; Izquierdo, et al., 2009). En todos estos trabajos se llevó a cabo el mismo protocolo de fatiga, el cual consistió en 5 series de 10RM (2 min de recuperación entre series) en el ejercicio de prensa de piernas, y se encontró un descenso en la potencia medida inmediatamente después de la sesión de entrenamiento que osciló entre el 40 - 60% (Gorostiaga, et al., 2012a; Gorostiaga, et al., 2014; Gorostiaga, et al., 2012b; Izquierdo, et al., 2011; Izquierdo, et al., 2009), similar al mostrado en nuestro estudio. Estos cambios en la potencia máxima pre-post esfuerzo estuvieron asociados con un aumento de la concentración de ácido úrico, de lactato muscular, un descenso en la concentración muscular de ATP y un incremento de varios índices de electromiografía de superficie relacionados con la actividad neuromuscular (Gorostiaga, et al., 2012a; Gorostiaga, et al., 2014; Gorostiaga, et al., 2012b; Izquierdo, et al., 2011). Además, Izquierdo et al., (2009) analizaron también el curso de recuperación de esta variable realizando mediciones a los 3, 5, 10, 15 y 30 min después del entrenamiento. Al igual que en nuestro estudio, la potencia máxima se recuperó de manera significativa en los primeros

5-10 min después del ejercicio, sin embargo, a los 15 - 30 min, aun no se había alcanzado los valores pre-fatiga, encontrándose en un ~80% de los valores iniciales.

En cuanto a las variables relacionadas con la producción de fuerza en la unidad de tiempo, no conocemos ningún estudio en el que se haya cuantificado el porcentaje de pérdida y de recuperación de estas variables medidas durante activaciones dinámica concéntrica después de un test de fatiga. Nuestros datos suponen, en este sentido, una aportación para la comprensión de los efectos de la fatiga sobre el sistema neuromuscular. Aunque el modelo de pérdida y de recuperación fue similar para todas las variables relacionadas con la RFD, cada una de ellas mostró un porcentaje de pérdida diferente. Las variables MRFD, RFD<sub>0-75</sub> y RFD<sub>0-100</sub> mostraron un descenso acusado (64 - 67%) seguido por una rápida recuperación hasta los 10 min post-esfuerzo, alcanzando el 80% de los valores iniciales a los 20 min, mientras que la RFD<sub>0-25</sub> y la RFD<sub>0-50</sub> mostraron un descenso inicial ligeramente menor (57 - 62%) y la recuperación fue más lenta, llegando solo hasta el 72 - 74% de los valores iniciales tras 20 min de recuperación (**Figura 15**). Este comportamiento parece estar en concordancia con algunos estudios que indican que las fases temprana y tardía del inicio de la fuerza dependen de factores neuromusculares diferentes (Andersen, et al., 2010; de Oliveira, Rizatto, & Denadai, 2013; Morais de Oliveira, Greco, Molina, & Denadai, 2012; A. S. Oliveira, Corvino, Caputo, Aagaard, & Denadai, 2016; F. B. Oliveira, Oliveira, Rizatto, & Denadai, 2013). Por tanto, si se mide la RFD para estimar el grado de fatiga generado por una serie o sesión de entrenamiento, es necesario que la RFD sea medida en diferentes intervalos de tiempo para tener una mayor comprensión del grado de fatiga y de recuperación de los deportistas y de los factores asociados con dicho grado de fatiga.



**Figura 15.** Cambios relativos en distintas variables de RFD medidas antes, inmediatamente después del test de MNR y durante la recuperación durante activaciones dinámicas concéntricas.

### **B. Estimación de la fatiga a través de tests isométricos**

Algunos autores recomiendan que durante la realización de tests isométricos, los participantes deben mantener un cierto nivel de tensión o fuerza aplicada antes de realizar una activación isométrica máxima (Bazyler, Beckham, & Sato, 2015). Sin embargo, existen varios estudios (Van Cutsem & Duchateau, 2005; Viitasalo, 1982) que indican que el nivel de pre-tensión inicial condiciona los valores de fuerza máxima y, sobre todo, de producción de fuerza en la unidad de tiempo alcanzados durante dicha activación máxima. Por tanto, para poder cuantificar el grado de fatiga producido por un protocolo de esfuerzo determinado durante activaciones estáticas, es importante que el nivel de pre-tensión inicial sea similar durante todas las evaluaciones realizadas. Para nuestro conocimiento, este es el primer estudio en el que se comprobó que el nivel de fuerza aplicado antes de realizar la activación máxima fue similar en todos los intervalos de tiempo evaluados.

El test de MNR produjo un descenso acusado en todas las variables medidas durante las activaciones isométricas entre el Pre y el Post 1. Esta disminución y su posterior recuperación a los 3, 5, 10, 15 y 20 min post-esfuerzo fue diferente en cada una de esas variables (**Tabla 11**). Sin embargo, a partir de los 5 - 10 min de recuperación, ninguna variable experimentó cambios en las sucesivas mediciones en relación con el valor alcanzado en esos primeros 5 min. De todas las variables medidas, la MRFD (~66.3%),



la  $RFD_{0-75}$  (~67.6%) y la  $RFD_{0-100}$  (~69.1%) fueron las que mostraron un mayor porcentaje de descenso entre los valores iniciales y los obtenidos inmediatamente después de hacer el test de MNR. En general, todas las variables relacionadas con la producción de fuerza en la unidad de tiempo no alcanzaron a recuperar los valores pre-fatiga después de 20 min. Por el contrario, el pico de fuerza mostró un grado de pérdida menor (~29.7%) y alcanzó valores similares a los iniciales a los 20 min de recuperación. De acuerdo con algunos trabajos previos (Jenkins et al., 2014; Molina & Denadai, 2012; Penailillo, Blazevich, Numazawa, & Nosaka, 2015), estos resultados indican que el pico de fuerza y la producción de fuerza en la unidad de tiempo tienen cursos de recuperación distintos y, por tanto, se ha considerado que son identidades de fuerza diferentes y que, por ello, dependen de factores neuromusculares distintos (Holtermann, et al., 2007).

Los test isométricos han sido extensamente utilizados para estimar la fatiga neuromuscular producida por un protocolo de esfuerzo (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Ahtiainen, et al., 2003; Chapman, et al., 2006; Chiu, Fry, Schilling, Johnson, & Weiss, 2004; Hamada, Sale, MacDougall, & Tarnopolsky, 2003; Jenkins, et al., 2014; Masuda, Masuda, Sadoyama, Inaki, & Katsuta, 1999; Penailillo, et al., 2015; Warren, Lowe, & Armstrong, 1999), porque determinan la capacidad que tiene el músculo de generar fuerza bajo unas condiciones relativamente estables y constantes (Cairns, Knicker, Thompson, & Sjogaard, 2005). En la mayoría de estos trabajos solo se analizó el PF, el cual, en general, experimentó una pérdida pre-post esfuerzo que osciló entre el ~20% (Chiu, et al., 2004; Hakkinen, 1993; Hamada, et al., 2003; Molina & Denadai, 2012) y el ~60% (Ahtiainen, et al., 2003), aunque la mayoría encuentra valores de pérdida intermedios (~40 - 50%) (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Chapman, et al., 2006; Izquierdo, et al., 2009). El mayor porcentaje de pérdida de fuerza post-esfuerzo mostrado en la mayoría de estos estudios en comparación con nuestro trabajo puede deberse a las diferencias en el protocolo de esfuerzo utilizado. En la mayoría de los estudios mencionados anteriormente se analizó la fuerza isométrica máxima antes y después de sesiones completas de entrenamiento, las cuales estaban compuestas por varias series (desde 5 a 36 series) hasta el fallo muscular (Chapman, et al., 2006; Chiu, et al., 2004; Izquierdo, et al., 2009; Molina & Denadai, 2012; Walker, Peltonen, Ahtiainen, Avela, & Hakkinen, 2009). En otros estudios utilizaron un protocolo de esfuerzo que consistió en mantener un cierto porcentaje de fuerza isométrica máxima

durante un tiempo prolongado (Neyroud, Maffiuletti, Kayser, & Place, 2012; Sogaard, Gandevia, Todd, Petersen, & Taylor, 2006), mientras que otros utilizaron un gran número de repeticiones excéntricas (Jenkins, et al., 2014; Molina & Denadai, 2012), las cuales están asociadas con un mayor grado de fatiga (Byrne, Twist, & Eston, 2004). Aquellos estudios en los que se utilizaron protocolos de esfuerzo parecidos a los empleados en el presente estudio (Cheng & Rice, 2009; Izquierdo, et al., 2009; Wadden, Button, Kibele, & Behm, 2012), mostraron también una pérdida de fuerza isométrica máxima similar (~20 - 30%). Sin embargo, a diferencia de nuestros resultados, estos estudios revelaron que el pico de fuerza isométrico no alcanzó a recuperarse después 20 (Cheng & Rice, 2009), 30 (Izquierdo, et al., 2009) o 60 min (Wadden, et al., 2012) después del esfuerzo.

Existen pocos estudios en los que se haya cuantificado el grado de fatiga través de variables relacionadas con la producción de fuerza en la unidad de tiempo después de protocolos de entrenamiento en los que se usen activaciones isoinerciales concéntricas (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Chiu, et al., 2004; Marshall, Robbins, Wrightson, & Siegler, 2012). Al igual que en nuestro estudio, en estos trabajos (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Chiu, et al., 2004; Marshall, et al., 2012) se encontró que la magnitud de cambio alcanzada después del esfuerzo de fatiga fue diferente (~11 - 34%) para cada una de las variables de RFD evaluadas (MRFD, RFD<sub>500</sub>, RFD<sub>media</sub>, RFD obtenida al 25% de la fuerza isométrica máxima). Sin embargo, esos porcentajes de pérdida fueron inferiores a los encontrados en el presente estudio. Esto se pudo deber a (1) que el número de repeticiones realizadas en cada serie de entrenamiento fue menor a la mitad de las repeticiones que se podían completar hasta el fallo muscular (Chiu, et al., 2004), y (2) a las diferencias en el ejercicio empleado, o mejor dicho, las características de los músculos implicados (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Marshall, et al., 2012). En relación con esta segunda explicación, se ha descrito que las fibras musculares tipo II (o de contracción rápida) son las que están más relacionadas con una mayor producción de fuerza en la unidad de tiempo (Harridge et al., 1996; Korhonen et al., 2006) y, además, son las que más se fatigan durante un esfuerzo realizado a la máxima velocidad posible hasta el fallo muscular (Hamada, et al., 2003). Dado que se ha demostrado que los miembros superiores poseen una mayor proporción de fibras tipo II en relación con los miembros inferiores (Mygind, 1995; Sanchis-Moysi et al., 2010), estos factores antes mencionados pueden explicar la mayor pérdida de RFD encontrada en nuestro estudio

en comparación con otros estudios que han analizado los cambios en la RFD después de un protocolo de fatiga en los miembros inferiores (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Chiu, et al., 2004; Marshall, et al., 2012; Schantz, Randall-Fox, Hutchison, Tyden, & Astrand, 1983).

Otros trabajos también han analizado los cambios en la RFD medida durante activaciones estáticas después de llevar a cabo activaciones excéntricas de los extensores de rodilla (Molina & Denadai, 2012) o los flexores del antebrazo (Jenkins, et al., 2014). A pesar de las diferencias en el protocolo de esfuerzo realizado, los resultados obtenidos en ambos estudios (Jenkins, et al., 2014; Molina & Denadai, 2012) son similares en cuanto al modelo de comportamiento de las variables de RFD después del esfuerzo y durante la recuperación, y a las diferencias en la magnitud de pérdida alcanzada entre las diferentes variables de RFD analizadas. Por tanto, al igual que en las activaciones dinámicas, si se mide la RFD durante activaciones estáticas para estimar el grado de fatiga generado por una serie o sesión de entrenamiento, es necesario que ésta sea medida en diferentes intervalos de tiempo para tener una mayor comprensión del grado de fatiga y de recuperación de los deportistas, así como de los factores asociados con dicho grado de fatiga.

### **C. Comparación de la fatiga estimada a través de tests dinámicos y estáticos**

Las comparaciones entre las pérdidas y la recuperación producidas en las variables comunes a las activaciones dinámicas concéntricas e isométricas no reflejaron diferencias significativas. Tanto el PF (29.1% vs. 29.7% para las activaciones dinámica e isométrica, respectivamente) como la RFD medida en distintos intervalos de tiempo (66.3 - 56.9% vs. 69.1 - 59.3% para las activaciones dinámica e isométrica, respectivamente) (**Figura 14**) mostraron un porcentaje de pérdida similar después del test de MNR. Del mismo modo, el porcentaje de recuperación de estas variables obtenido en los diferentes intervalos de tiempo post-esfuerzo evaluados también fue muy similar, no encontrándose diferencias significativas entre las activaciones dinámicas e isométricas. Estos resultados parecen estar en contra de aquellos estudios que indican que el grado de fatiga cuantificado depende del protocolo utilizado para causar fatiga y del tipo de ejercicio usado para estimar dicha fatiga (Barry & Enoka, 2007; Cairns, et al., 2005; Enoka & Duchateau, 2008; Halson, 2014; Sahlin, 1992), ya que la cuantificación de la

fatiga medida a través de los cambios de una misma variable obtenida de activaciones estáticas y dinámicas fue prácticamente la misma. En concordancia con estos resultados, existen varios estudios que tampoco encontraron diferencias significativas en el grado de pérdida y de recuperación de la fuerza medida a través de activaciones dinámicas e isométricas después de la realización de diferentes protocolos de fatiga (Byrne & Eston, 2002; Byrne, Eston, & Edwards, 2001; Ferri, Narici, Grassi, & Pousson, 2006). Por tanto, nuestros resultados parecen indicar que, más que del tipo de ejercicio usado para cuantificar el grado de fatiga, los cambios en la fuerza, la velocidad o la RFD depende del protocolo de esfuerzo llevado a cabo. Sin embargo, varios estudios (Cheng & Rice, 2005, 2009; Wadden, et al., 2012) han mostrado que la realización de un protocolo de fatiga consistente en la ejecución de activaciones dinámicas o isométricas alcanzando la misma pérdida de fuerza máxima en la serie produjo una magnitud de pérdida (y de recuperación) de velocidad, fuerza y potencia muy similar, independientemente del protocolo utilizado para inducir fatiga. En base a estos resultados, parece que son necesarios más estudios que confirmen la hipótesis de *la dependencia de la tarea* de la fatiga muscular descrita por algunos autores (Asmussen, 1979; Bigland-Ritchie, Rice, Garland, & Walsh, 1995; Enoka & Duchateau, 2008).

#### 4.5.4. Conclusiones

Las principales conclusiones del **Estudio I.2** fueron las siguientes:

- El porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo que puede ser completado cuando se alcanza una determinada pérdida de VMP en la serie muestra una alta fiabilidad absoluta.
- La fatiga neuromuscular estimada a través de activaciones dinámicas producida por la realización de una serie hasta el fallo muscular se manifiesta en mayor medida a través de los cambios en la velocidad, la potencia y la producción de fuerza en la unidad de tiempo medida en cortos intervalos de tiempo (MRFD, RFD<sub>0-25</sub>, RFD<sub>0-50</sub>) que a través de los cambios en el pico de fuerza.
- Del mismo modo, la fatiga neuromuscular estimada a través de activaciones estáticas producida por la realización de una serie hasta el fallo muscular se manifiesta en mayor medida en la producción de fuerza en la unidad de tiempo que en el pico de fuerza.
- La realización de una serie hasta el fallo muscular con una carga que se puede desplazar inicialmente a una VMP de  $\sim 0.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (60% 1RM), en el ejercicio de press de banca, produce un estado de fatiga que no desaparece totalmente después de 20 min de recuperación.
- Cuando se realiza un mismo protocolo de esfuerzo para inducir fatiga, la fuerza y RFD medidas durante activaciones dinámicas concéntricas y durante activaciones isométricas muestran el mismo grado de pérdida y de recuperación tras el esfuerzo.



#### 4.5.5. Aplicaciones Prácticas

Dada la fuerte relación entre la pérdida de VMP en la serie con la fatiga y el porcentaje de repeticiones realizado con respecto a las repeticiones posibles en la serie, así como la alta fiabilidad absoluta que muestra el porcentaje de repeticiones realizado para cada magnitud de pérdida de VMP en la serie, se recomienda controlar el volumen de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza a través de la pérdida de VMP en la serie.

Además, los resultados de este estudio confirman que, si se pretende evaluar el grado de fatiga que ha producido un determinado tipo de esfuerzo, se debería controlar la pérdida de velocidad o RFD y el tiempo de recuperación de dichas variables, más que la pérdida de fuerza.

Aunque no se encontraron diferencias significativas entre el grado de pérdida y de recuperación entre las variables medidas a través de activaciones dinámicas e isométricas, las activaciones isométricas están asociadas con una mayor número de inconvenientes (p.ej., ángulo en el que se realiza la evaluación, posiciones incómodas y necesidad de familiarización), y son menos habituales durante los gestos y acciones de la vida diaria y del deporte, las cuales son dinámicas por naturaleza. Por tanto, se recomienda que el grado de fatiga y la recuperación de la misma se midan en activaciones dinámicas.

En caso de cuantificar el grado de fatiga y de recuperación después de un esfuerzo a través de activaciones estáticas, sería conveniente evaluar y controlar variables relacionadas con la producción de fuerza en la unidad de tiempo, en vez del pico de fuerza isométrica máxima, para conocer el grado de recuperación después de una serie o sesión de entrenamiento.





## **4.6. Estudio I.3:**

***Análisis y comparación de la pérdida de velocidad obtenida durante y después de una serie realizada hasta el fallo muscular ante 4 cargas distintas (50, 60, 70 y 80% 1RM) en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa***





## 4.6. Estudio I.3: Análisis y comparación de la pérdida de velocidad obtenida durante y después de una serie realizada hasta el fallo muscular ante 4 cargas distintas (50, 60, 70 y 80% 1RM) en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa

### 4.6.1. Metodología

#### A. Tipo de Investigación

El **Estudio I.3** tiene unas características similares al **Estudio I.1**, por tanto, se trata de una investigación *cuantitativa* y fundamentalmente *descriptiva*, aunque podemos considerar la variable *Intensidad Relativa (% 1RM)* como independiente. La investigación es *inferencial*, *correlacional* y de carácter fundamentalmente *transversal*.

#### B. Muestra

En este estudio participaron 20 hombres sanos y físicamente activos (Media  $\pm$  desviación típica: edad:  $25.0 \pm 3.5$  años; altura:  $1.77 \pm 0.06$  m; masa corporal:  $76.0 \pm 7.2$  kg). Todos eran estudiantes del Grado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte con al menos 8 meses de experiencia previa en el entrenamiento de fuerza. Además, estaban familiarizados con los ejercicios de press de banca y sentadilla completa porque habían participado previamente en algunas evaluaciones y tests con nuestro grupo de trabajo. Tras ser informados del propósito de la investigación y los procedimientos experimentales, todos los participantes dieron su consentimiento por escrito, firmando el documento de Consentimiento Informado (**ANEXO I**) antes de tomar parte en el estudio.

Los requisitos necesarios para participar en este estudio han sido descritos previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.B).

### C. Diseño del Estudio

El presente estudio fue diseñado para analizar y comparar: 1) la magnitud de pérdida de velocidad alcanzada durante y después una serie realizada hasta el fallo muscular ante 4 intensidades relativas distintas, y 2) la magnitud de pérdida de velocidad después de cada serie hasta el fallo muscular en función del número de repeticiones realizado en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa. En las dos semanas anteriores a la realización de los tests, se llevaron a cabo 4 sesiones de familiarización (2 sesiones por semana) que consistieron en la realización de varias series de entrenamiento ejecutando cada repetición a la máxima velocidad posible. Durante estas sesiones de familiarización, los participantes eran informados en tiempo real de la velocidad a la que estaban realizando cada repetición. En la última sesión de familiarización, los participantes llevaron a cabo un test isoinercial de cargas progresivas para conocer la relación fuerza/carga - velocidad y la repetición máxima (1RM) en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa. Después de las evaluaciones iniciales, cada participante realizó 8 sesiones separadas por 5-7 días cada una de ellas. En cada sesión, los participantes llevaron a cabo un test de MNR (4 en el ejercicio de press de banca y 4 en el ejercicio de sentadilla completa), es decir, hasta el fallo muscular, con 4 intensidades relativas diferentes. Las sesiones fueron distribuidas de manera aleatoria para cada participante, alternándose los ejercicios de sentadilla completa y press de banca en cada una de las sesiones. La carga relativa para cada participante en cada sesión de test fue determinada a partir de la relación fuerza/carga - velocidad en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa, ya que se ha encontrado que existe una estrecha relación entre el % 1RM y la VMP para estos ejercicios (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, García-Pallarés, Pérez, Fernandes, & González Badillo, 2011; Sánchez-Medina, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2017). De este modo, se usó una determinada VMP objetivo en cada sesión como estimación del % 1RM, la cual tenía que ser alcanzada durante la primera o segunda repetición del test de MNR. Dichas velocidades objetivo fueron las siguientes: 1)  $\sim 0.93 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (50% 1RM),  $\sim 0.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (60% 1RM),  $\sim 0.62 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (70% 1RM), y  $\sim 0.47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (80% 1RM) para el ejercicio de press de banca (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2014); 2)  $\sim 1.13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (50% 1RM),  $\sim 0.98 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (60% 1RM),  $\sim 0.82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (70% 1RM), y  $\sim 0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (80% 1RM) para el ejercicio de sentadilla completa (Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2011; Sánchez-

Medina, et al., 2017). Para poder ajustar la velocidad de ejecución a la velocidad asociada ( $\pm 0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $\pm 0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para los ejercicios de press de banca y sentadilla completa, respectivamente) con cada % 1RM objetivo de cada sesión, la carga absoluta (kg) se ajustó individualmente para cada participante. Para comparar el grado de fatiga generado por una serie realizada hasta el fallo muscular en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, se analizó la pérdida de velocidad post-esfuerzo ante una carga que se podía desplazar a una velocidad de  $\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $C1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) antes de realizar el ejercicio.

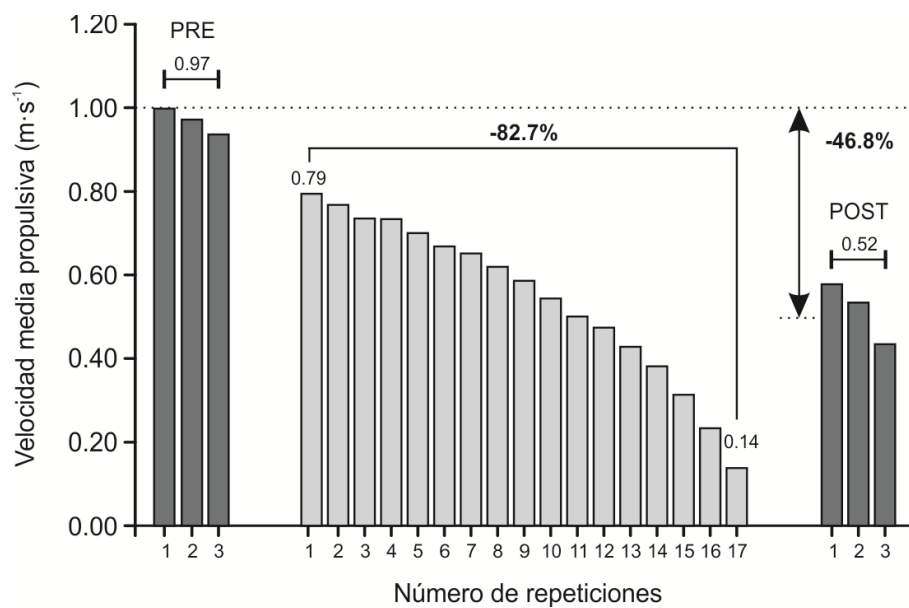
#### D. Variables Objeto de Estudio

Las principales variables analizadas en el **Estudio I.3** fueron:

- **Fuerza dinámica máxima (1RM), en kg:** Peso máximo con el que un individuo puede realizar solamente una repetición.
- **Velocidad de la 1RM ( $VMP_{RM}$ ), en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ :** VMP a la que se consigue la 1RM.
- **Mejor VMP ( $VMP_{\text{mejor}}$ ), en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ :** Velocidad media propulsiva de la mejor (normalmente la primera) repetición de la serie.
- **Peor VMP ( $VMP_{\text{última}}$ ), en  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ :** Velocidad media propulsiva de la última repetición de la serie.
- **Pérdida de velocidad, en porcentaje:** Máxima pérdida de VMP obtenida dentro de cada serie, definida como:  $100 \cdot (VMP_{\text{mejor}} - VMP_{\text{última}}) / VMP_{\text{mejor}}$ .
- **Carga, en kg:** Peso absoluto utilizado en cada test de MNR, en kg.
- **Repeticiones realizadas (Rep):** Máximo número de repeticiones realizado en cada test de MNR.
- **Pérdida de VMP con la carga de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $C1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), en porcentaje:** diferencia de VMP entre la media de 3 repeticiones realizadas a máxima velocidad antes e inmediatamente después de cada test de MNR [i.e.,  $100 \cdot (\text{promedio de } VMP_{\text{post}} - \text{promedio de } VMP_{\text{pre}}) / \text{promedio de } VMP_{\text{pre}}$ ] con la carga absoluta con la que se consigue una VMP de  $\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  antes de realizar el ejercicio. Esta carga se

mide para cada sesión después del calentamiento, antes de pasar a realizar el test de MNR correspondiente, y a los ~10-15 s después de haber terminado el esfuerzo.

En la **Figura 16** se presenta un ejemplo de cómo se determinan las citadas pérdidas de velocidad (dentro de la serie y con la  $C1m \cdot s^{-1}$ ) a partir de los valores medios de VMP conseguidos en cada repetición.



**Figura 16.** Ejemplo de determinación de las pérdidas de velocidad (dentro de la serie y con la  $C1m \cdot s^{-1}$ ) tras la realización de un test de MNR con el 60% 1RM en el ejercicio de press de banca.

## E. Control de Variables Extrañas

Este apartado ya ha sido descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.E).

## F. Evaluaciones y Pruebas Físicas

### Análisis antropométrico

- **Masa corporal** (kg): descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F).
- **Talla** (m): descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F).

### **Pruebas físicas**

- **Test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de press de banca:** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio I.2** (Apartado 4.5.1.F).
- **Test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de sentadilla completa:** Este test se realizó sobre una máquina tipo *Smith* (**Figura 1**) y fue utilizado para medir la curva fuerza/carga - velocidad y la 1RM. Para su realización, los participantes partían desde una posición de pie, con las rodillas y las caderas totalmente extendidas, los pies paralelos con una separación entre ellos similar a la anchura de los hombros, y con la barra colocada por detrás de la cabeza apoyada sobre la parte superior de la espalda. A partir de esta posición, se realizaba una flexión profunda de las piernas, hasta que la parte posterior del muslo tomaba contacto con la parte posterior de la pierna, pasando a continuación a la extensión inmediata y completa de las piernas (**Figura 17**). A diferencia de la velocidad de bajada (fase excéntrica), la cual se realizó a una velocidad controlada ( $\sim 0.50\text{-}0.65\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), se le pidió a los participantes que ejecutaran la fase de subida (fase concéntrica) a la máxima velocidad posible en cada repetición. Se controló estrictamente que los participantes no saltasen ni se despegasen la barra del cuello al final del recorrido concéntrico. Antes del test, se realizó un calentamiento estandarizado que consistió en 5 min de carrera suave, 5 min de ejercicios de movilidad articular de piernas seguido por dos series de 8 y 6 repeticiones (3 min de recuperación entre ellas) con 20 y 30 kg, respectivamente. La carga inicial del test se estableció en 30 kg para todos los participantes y fue incrementando progresivamente de 10 en 10 kg hasta que la VMP obtenida durante la fase concéntrica del movimiento fue inferior a  $0.8\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . A partir de esta velocidad, la carga fue ajustada con menores incrementos (desde 5 a 1

kg) hasta que se alcanzó la 1RM. Ésta fue considerada como la mayor carga levantada por un participante ejecutando correctamente (rango completo de movimiento) una repetición. Durante el test, se realizaron 3 repeticiones con cargas bajas ( $VMP > 1.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), dos con cargas medias ( $1.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} > MPV > 0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), y solo una con cargas altas ( $MPV < 0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). El tiempo de recuperación entre series osciló entre 3 (cargas bajas) y 4 min (cargas altas).



**Figura 17.** Representación gráfica de la ejecución del ejercicio de sentadilla completa mostrando las posiciones de inicio y fin de la fase concéntrica.

- **Test de máximo número de repeticiones hasta el fallo:** Cada participante realizó 8 test de MNR (4 en el ejercicio de press de banca y 4 en el ejercicio de sentadilla completa) ante 4 intensidades relativas diferentes: 50, 60, 70 y 80% 1RM. Antes de empezar cada test de MNR, se ajustó la carga propuesta (kg), cuando fue necesario, para que la VMP máxima de la serie (normalmente la primera repetición) coincidiera con la VMP correspondiente a cada intensidad relativa (ver apartado **4.6.1.C Diseño del Estudio**). Durante cada test de MNR, se le pidió a los sujetos que desplazaran la barra a la máxima velocidad posible durante la fase concéntrica, desde la primera a la última repetición de la serie (fallo muscular). Las especificaciones de este test en el ejercicio de press de banca ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F).



En cada sesión, los participantes realizaron un calentamiento estandarizado el cual consistió en 5 min de carrera suave, 5 min de ejercicios de movilidad articular de brazos o piernas, seguido por 3 series de 6-3 repeticiones (con 3 min de recuperación entre cada una de ellas) con cargas progresivamente mayores hasta llegar a la carga con la que se obtuvo una VMP de  $\sim 1.00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $1.00 \pm 0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para el ejercicio de press de banca, y  $1.00 \pm 0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para el ejercicio de sentadilla completa). Se eligió este valor porque: 1) representa una velocidad relativamente alta, la cual se alcanza con cargas medias [ $\sim 47\%$  1RM y  $\sim 60\%$  1RM en el ejercicio de press de banca y sentadilla completa, respectivamente (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2011; Sánchez-Medina, et al., 2017)]; 2) es una carga que nos permite tener una buena expresión del efecto de un ejercicio de fuerza sobre diferentes variables mecánicas como la velocidad, la fuerza y la RFD (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011); y 3) se trata de una carga fácil de mover y que puede ser bien tolerada por los participantes para ser realizada después de un ejercicio fatigante (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Por tanto, se tomó la VMP con la  $C_{1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}}$  como una medida de referencia pre-esfuerzo para poder comparar las pérdidas de velocidad producidas después de cada test de MNR. Los participantes ejecutaron 3 repeticiones a la máxima velocidad posible con la  $C_{1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}}$  antes de realizar el test de MNR e inmediatamente después de completar la última repetición del test de MNR. Para ello, la carga fue cambiada en 10-15 s con la ayuda de dos colaboradores.

## G. Instrumental de Evaluación

### *Máquina tipo Smith*

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.G).

### *Transductor lineal de velocidad*

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.G).

## H. Plan de trabajo

Cada participante realizó un total de 9 sesiones de evaluación (un test de cargas progresivas hasta la determinación de la 1RM y 8 tests de MNR) separadas por 5-7 días. Se establecieron 8 turnos (10:00 h, 11:00 h, 12:00 h, 13:00 h, 16:00 h, 17:00 h, 18:00 h y 19:00 h) durante cada día para que los participantes pudieran elegir la hora a la que realizar los esfuerzos. Después de la primera sesión de evaluación, se prestó especial atención en que los participantes realizaran todos los tests de MNR a la misma hora ( $\pm 1$ h) para intentar eliminar posibles variables contaminantes. Además, los test de MNR fueron distribuidos de manera aleatoria para cada participante. Para poder controlar adecuadamente las sesiones de evaluación, el número máximo de participantes en cada turno fue de 2. Cada sesión tuvo una duración aproximada de 35-40 min.

## I. Análisis estadístico

La media, la desviación típica (DT) y el coeficiente de correlación de *Pearson* se calcularon a través de métodos estadísticos estandarizados. Para comprobar la normalidad de la distribución en cada una de las variables se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk. Se usó una prueba ANOVA factorial 2x4 con medidas repetidas con un factor entre grupos (ejercicio: press de banca vs. sentadilla completa) y un factor intra-grupo (Intensidad relativa: 50% vs. 60% vs. 70% vs. 80% 1RM) para cada variable con el objetivo de analizar las diferencias intra- e inter-ejercicio. Se aplicó el correspondiente test de ajuste / corrección de *Bonferroni* para detectar las diferencias entre las medias. Se utilizó una prueba *t* de *Student* para analizar las diferencias en el porcentaje de pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  entre aquellos participantes que hacían un mayor número de repeticiones (GAR) y aquellos que hacían un menor número de repeticiones (GBR) en cada test de MNR. La relación entre el porcentaje de pérdida de VMP y el porcentaje de repeticiones realizado con las diferentes intensidades relativas utilizadas fue estudiado mediante un ajuste polinómico de segundo grado. Del mismo modo, las relaciones entre la intensidad relativa y el porcentaje de pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  también fue estudiado a través de un ajuste polinómico de segundo grado. El nivel de significación estadístico se fijó en el 5% ( $P \leq 0.05$ ). Todos los análisis fueron realizados utilizando el paquete de software estadístico SPSS versión 17.0 (SPSS, Chicago, IL).

#### 4.6.2. Resultados

Los valores de 1RM fueron  $79.6 \pm 11.05$  kg y  $115.6 \pm 16.9$  kg, mientras que la VMP correspondiente a la 1RM ( $VMP_{1RM}$ ) fue de  $0.14 \pm 0.06$  m·s<sup>-1</sup> y  $0.31 \pm 0.04$  m·s<sup>-1</sup> para los ejercicios de press de banca y sentadilla completa, respectivamente. En la **Tabla 12** aparece un resumen de las características de cada una de las series realizadas hasta el fallo muscular en ambos ejercicios. No se observaron diferencias significativas entre los valores de la VMP objetivo y el promedio del valor más alto de VMP ( $VMP_{mejor}$ ) alcanzado en cada una de las series con ninguna de las cargas ni en ninguno de los ejercicios utilizados. El promedio de la VMP de la última repetición de cada serie ( $VMP_{última}$ ) fue similar para todas las cargas utilizadas (**Tabla 12**), y no se encontraron diferencias significativas entre la  $VMP_{última}$  y la  $VMP_{1RM}$  en ninguno de los dos ejercicios. A medida que incrementó la intensidad relativa, el número de repeticiones realizado y la magnitud de pérdida de VMP dentro de la serie descendieron progresivamente en ambos ejercicios analizados. El número de repeticiones realizado y la pérdida de VMP en la serie fueron significativamente mayores, para todas las intensidades relativas analizadas, en el ejercicio de press de banca en comparación con el ejercicio de sentadilla completa. El número de repeticiones realizado mostró una alta variabilidad en ambos ejercicios independientemente de la intensidad relativa utilizada, alcanzando mayores valores de CV en la sentadilla completa (CV: 25.9 - 33.9%) que en el ejercicio de press de banca (CV: 14.5 - 21.8%).

**Tabla 12.** Variables descriptivas de las series realizadas hasta el fallo muscular ante las 4 intensidades relativas estudiadas en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.

	50% 1RM		60% 1RM		70% 1RM		80% 1RM	
	SQ (~1.13 m·s <sup>-1</sup> )	PB (~0.93 m·s <sup>-1</sup> )	SQ (~0.98 m·s <sup>-1</sup> )	PB (~0.79 m·s <sup>-1</sup> )	SQ (~0.82 m·s <sup>-1</sup> )	PB (~0.62 m·s <sup>-1</sup> )	SQ (~0.68 m·s <sup>-1</sup> )	PB (~0.48 m·s <sup>-1</sup> )
<b>VMP<sub>mejor</sub></b> (m·s <sup>-1</sup> )	1.13 ± 0.02 <sup>a,b,cx</sup> (1.16 - 1.10)	0.93 ± 0.01 <sup>a,b,c</sup> (0.94 - 0.91)	0.99 ± 0.01 <sup>b,cx</sup> (1.01 - 0.96)	0.79 ± 0.01 <sup>b,c</sup> (0.81 - 0.77)	0.82 ± 0.01 <sup>cx</sup> (0.85 - 0.79)	0.62 ± 0.01 <sup>c</sup> (0.64 - 0.60)	0.69 ± 0.02 <sup>*</sup> (0.71 - 0.66)	0.47 ± 0.01 (0.49 - 0.45)
<b>VMP<sub>última</sub></b> (m·s <sup>-1</sup> )	0.28 ± 0.04 <sup>*</sup> (0.35 - 0.19)	0.14 ± 0.03 (0.22 - 0.09)	0.26 ± 0.07 <sup>*</sup> (0.42 - 0.16)	0.13 ± 0.02 (0.19 - 0.09)	0.29 ± 0.04 <sup>*</sup> (0.37 - 0.24)	0.13 ± 0.03 (0.18 - 0.06)	0.27 ± 0.04 <sup>*</sup> (0.34 - 0.21)	0.12 ± 0.02 (0.16 - 0.08)
<b>PV</b> (%)	75.5 ± 3.9 <sup>b,c</sup> (83.1 - 68.9)	84.8 ± 3.8 <sup>b,cx</sup> (90.5 - 76.1)	73.6 ± 6.6 <sup>b,c</sup> (87.9 - 56.6)	83.7 ± 3.0 <sup>b,cx</sup> (88.1 - 76.3)	64.6 ± 4.7 <sup>c</sup> (70.7 - 55.8)	79.3 ± 4.8 <sup>cx</sup> (90.3 - 70.5)	60.2 ± 6.7 (70.2 - 48.9)	73.9 ± 5.3 <sup>*</sup> (82.9 - 65.9)
<b>Rep</b>	23.4 ± 7.7 <sup>a,b,c</sup> (44 - 15)	25.2 ± 5.5 <sup>a,b,c</sup> (40 - 19)	16.2 ± 5.0 <sup>b,c</sup> (31 - 10)	19.3 ± 2.8 <sup>b,cx</sup> (24 - 15)	9.6 ± 3.3 <sup>c</sup> (18 - 5)	12.3 ± 2.3 <sup>cx</sup> (18 - 9)	6.0 ± 1.5 (10 - 4)	7.7 ± 1.5 <sup>*</sup> (10 - 5)
<b>Carga</b> (kg)	60.5 ± 11.3 <sup>a,b,cx</sup> (90 - 47.5)	38.0 ± 5.2 <sup>a,b,c</sup> (45 - 27.5)	72.0 ± 11.8 <sup>b,cx</sup> (99 - 57.5)	44.6 ± 6.8 <sup>b,c</sup> (55 - 30)	84.8 ± 12.6 <sup>cx</sup> (111 - 67.5)	54.4 ± 7.8 <sup>c</sup> (65 - 34)	92.6 ± 14.4 <sup>*</sup> (122.5 - 73.0)	63.1 ± 7.8 (74 - 44)

1RM: Una repetición máxima; PB: Press de banca; SQ: Sentadilla completa; PV: Pérdida de velocidad; Rep: número de repeticiones completadas en la serie;

VMP<sub>mejor</sub>: Velocidad media propulsiva de la repetición más rápida de la serie (normalmente la primera repetición); VMP<sub>última</sub>: Velocidad media propulsiva de la última repetición de la serie.

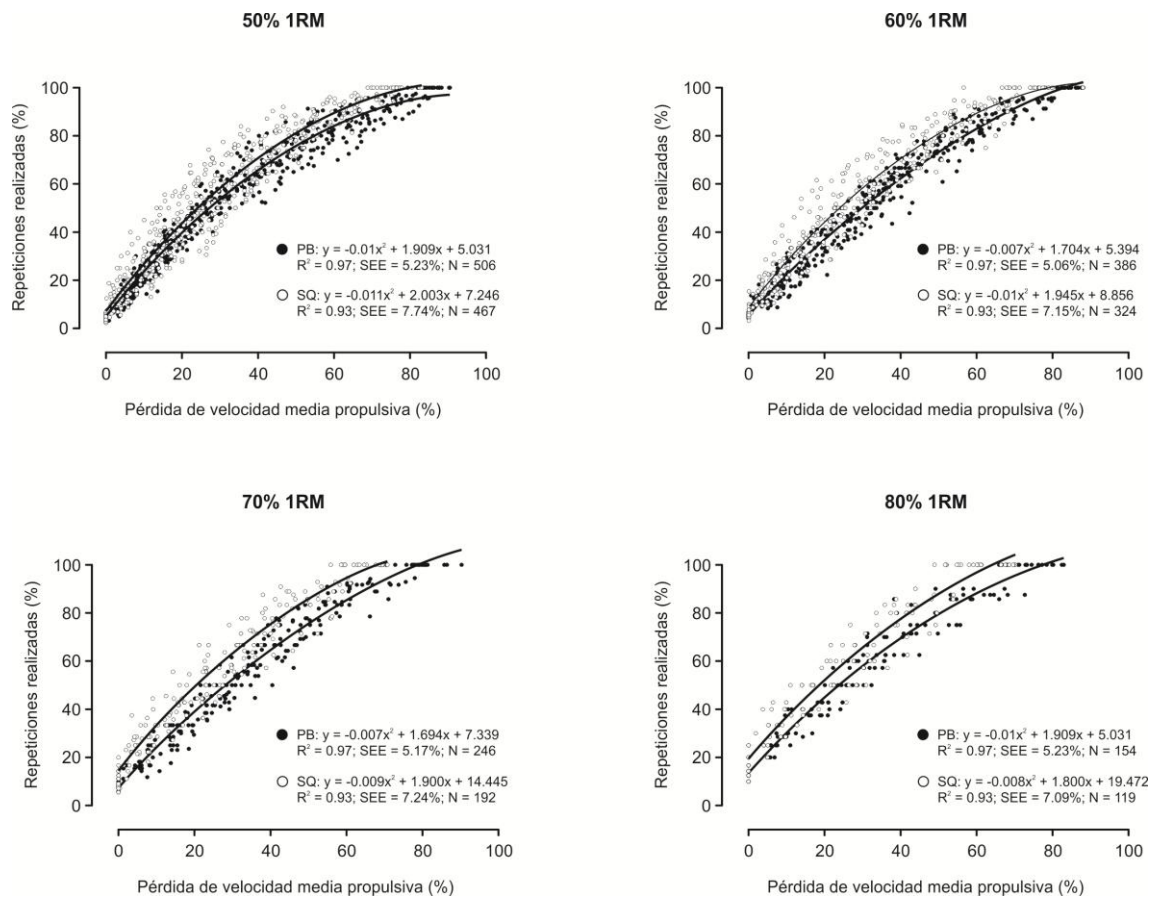
Diferencias estadísticamente significativas con respecto a: <sup>a</sup> 60% 1RM; <sup>b</sup> 70% 1RM; <sup>c</sup> 80% 1RM; <sup>\*</sup> SQ.

**Tabla 13.** Porcentaje de repeticiones realizado con respecto al total de repeticiones posibles en la serie ante determinados porcentajes de pérdidas de velocidad en la serie en los ejercicios de **press de banca** y **sentadilla completa**.

Pérdida de VMP (%)	50% 1RM		60% 1RM		70% 1RM		80% 1RM	
	SQ (~1.13 m·s <sup>-1</sup> )	PB (~0.93 m·s <sup>-1</sup> )	SQ (~0.98 m·s <sup>-1</sup> )	PB (~0.79 m·s <sup>-1</sup> )	SQ (~0.82 m·s <sup>-1</sup> )	PB (~0.62 m·s <sup>-1</sup> )	SQ (~0.68 m·s <sup>-1</sup> )	PB (~0.48 m·s <sup>-1</sup> )
10%	25.6 ± 6.2	23.0 ± 2.8	26.9 ± 5.7 *	21.3 ± 3.5	32.6 ± 6.6 <sup>ab*</sup>	23.4 ± 3.3	36.6 ± 5.6 <sup>ab,c*</sup>	29.7 ± 3.4 <sup>ab,c</sup>
15%	34.7 ± 7.0	31.4 ± 3.4	35.6 ± 6.8 *	29.0 ± 3.5	41.2 ± 7.8 <sup>ab*</sup>	31.0 ± 3.5	44.4 ± 6.7 <sup>ab,c*</sup>	37.1 ± 4.0 <sup>ab,c</sup>
20%	43.3 ± 7.7	39.4 ± 4.1	43.8 ± 7.6 *	37.4 ± 3.7	49.3 ± 8.7 <sup>ab*</sup>	38.4 ± 3.8	51.9 ± 7.8 <sup>ab*</sup>	44.2 ± 4.6 <sup>ab,c</sup>
25%	51.2 ± 8.2 *	46.8 ± 4.7	51.4 ± 8.2 *	44.4 ± 3.8	56.9 ± 9.3 <sup>ab*</sup>	45.4 ± 4.2	59.0 ± 8.7 <sup>ab*</sup>	51.0 ± 5.2 <sup>ab,c</sup>
30%	58.6 ± 8.5 *	53.7 ± 5.1	58.6 ± 8.5 *	51.1 ± 4.0	63.9 ± 9.5 <sup>ab*</sup>	52.2 ± 4.5	65.7 ± 9.4 <sup>ab*</sup>	57.4 ± 5.6 <sup>ab,c</sup>
35%	65.4 ± 8.5 *	60.2 ± 5.5	65.3 ± 8.5 *	57.5 ± 4.1	70.4 ± 9.4 <sup>ab*</sup>	58.6 ± 4.7	72.0 ± 9.9 <sup>ab*</sup>	63.5 ± 5.9 <sup>b,c</sup>
40%	71.7 ± 8.2 *	66.1 ± 5.7	71.4 ± 8.2 *	63.5 ± 4.1	76.4 ± 8.9 *	64.7 ± 4.7	77.9 ± 10.3 <sup>ab*</sup>	69.3 ± 6.1 <sup>b</sup>
45%	77.3 ± 7.7 *	71.5 ± 5.7	77.1 ± 7.7 *	69.2 ± 4.1	81.8 ± 8.0 *	70.5 ± 4.7	83.4 ± 10.7 <sup>ab*</sup>	74.7 ± 6.1 <sup>b</sup>
50%	82.4 ± 6.9 *	76.5 ± 5.6	82.3 ± 6.9 *	74.6 ± 4.0	86.7 ± 6.9 *	75.9 ± 4.6	88.5 ± 11.0 <sup>ab*</sup>	79.8 ± 5.9
55%	86.9 ± 5.8 *	80.9 ± 5.3	86.9 ± 6.1 *	78.6 ± 3.8	91.1 ± 5.6 *	81.1 ± 4.5	93.3 ± 11.3 <sup>ab*</sup>	84.5 ± 5.6
60%	90.8 ± 4.6 *	84.8 ± 4.9	91.1 ± 5.3 *	83.2 ± 3.6	94.9 ± 4.4 *	85.9 ± 4.3	97.6 ± 11.8 <sup>ab*</sup>	88.9 ± 5.2
65%	94.1 ± 3.3 *	88.3 ± 4.4	94.8 ± 5.1 *	87.6 ± 3.4	98.2 ± 4.2 *	90.5 ± 4.1	101.6 ± 12.5 <sup>ab*</sup>	93.0 ± 4.8

1RM: Una repetición máxima; PB: Press de banca; SQ: Sentadilla completa; PV: Pérdida de velocidad.  
Diferencias estadísticamente significativas con respecto a: <sup>a</sup> 50% 1RM; <sup>b</sup> 60% 1RM; <sup>c</sup> 70% 1RM; \* PB.

Para el ejercicio de press de banca, el porcentaje de repeticiones realizado con respecto a las repeticiones completadas en cada serie hasta el fallo muscular cuando se alcanzaba un determinado valor de pérdida de velocidad (desde el 10% al 65%) fue muy similar para las cargas del 50%, 60% y 70% 1RM, mientras que para el 80% 1RM, esos porcentajes de repeticiones para una pérdida de velocidad determinada fueron ligeramente superiores (**Tabla 13**). En relación con el ejercicio de sentadilla completa, el porcentaje de repeticiones realizado con respecto a las repeticiones completadas en cada serie hasta el fallo muscular cuando la magnitud de pérdida de VMP osciló entre 10% y 65% fue muy similar para las cargas del 50% y 60% 1RM. Sin embargo, los porcentajes de repeticiones realizados para cada magnitud de pérdida de VMP fueron progresivamente mayores para el 70% y el 80% 1RM, respectivamente (**Tabla 13**). La comparación entre ambos ejercicios mostró que, para el mismo porcentaje de pérdida de VMP en la serie, el porcentaje de repeticiones realizado fue mayor en el ejercicio de sentadilla completa que en el de press banca para todas las cargas evaluadas (**Tabla 13; Figura 18**).



**Figura 18.** Relación entre la magnitud de pérdida de velocidad alcanzada en la serie y el porcentaje de repeticiones realizado para todas las intensidades relativas usadas (50, 60, 70 y 80% 1RM) en los ejercicios de **press de banca** y **sentadilla completa**.

La pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  fue estadísticamente significativa ( $P < 0.05 - 0.001$ ) para todos los test de MNR. Para ambos ejercicios, cuanto mayor fue la intensidad relativa con la que se realizó el test de MNR, el porcentaje de pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  fue menor (**Figura 19A**). La comparación entre ambos ejercicios reveló que la pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  fue significativamente mayor para el press de banca que para la sentadilla completa en todas las cargas analizadas (**Tabla 14**). Cuando los datos de ambos ejercicios fueron agrupados, se encontró una relación significativa positiva entre la pérdida de velocidad en la serie y la pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  (**Figura 19B**).

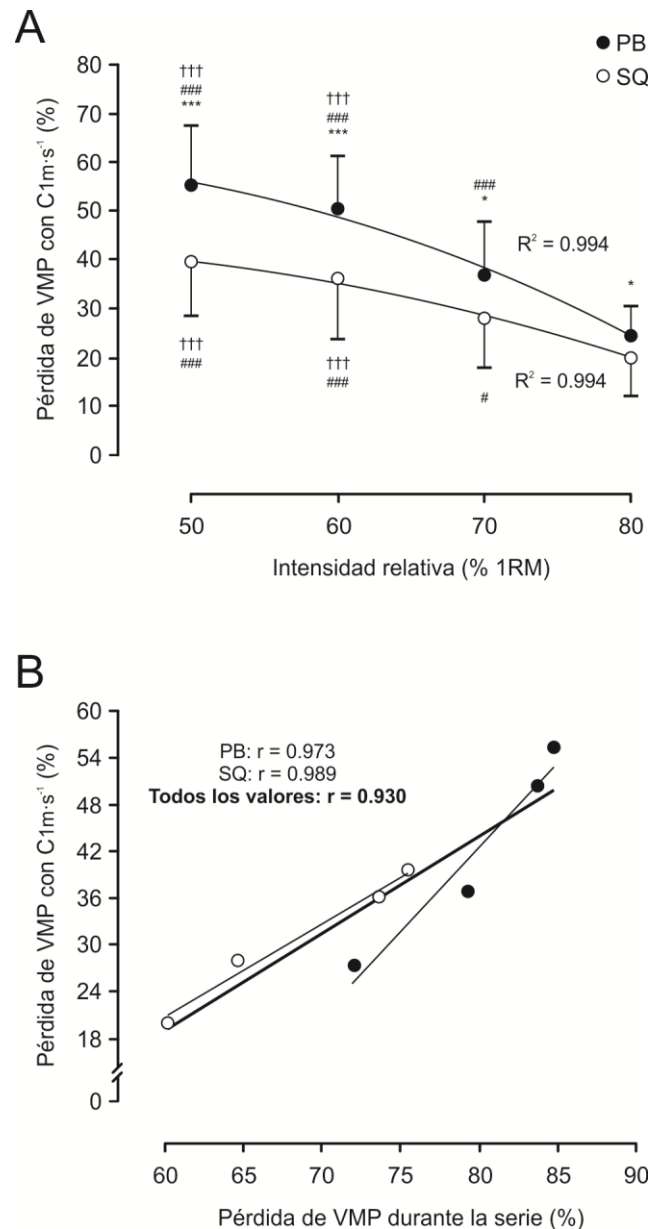
**Tabla 14.** Comparación de la pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  después de una serie hasta el fallo muscular con las distintas intensidades relativas utilizadas en los ejercicios se **press de banca** y **sentadilla completa**.

	50% 1RM			60% 1RM			70% 1RM			80% 1RM		
	SQ ( $\sim 1.13 m \cdot s^{-1}$ )	PB ( $\sim 0.93 m \cdot s^{-1}$ )	SQ ( $\sim 0.98 m \cdot s^{-1}$ )	PB ( $\sim 0.79 m \cdot s^{-1}$ )	SQ ( $\sim 0.82 m \cdot s^{-1}$ )	PB ( $\sim 0.62 m \cdot s^{-1}$ )	SQ ( $\sim 0.68 m \cdot s^{-1}$ )	PB ( $\sim 0.48 m \cdot s^{-1}$ )				
VMP <sub>mejor</sub> ( $m \cdot s^{-1}$ )	1.00 $\pm$ 0.02	1.00 $\pm$ 0.02	1.00 $\pm$ 0.02	1.00 $\pm$ 0.02	1.00 $\pm$ 0.02	0.99 $\pm$ 0.02	1.00 $\pm$ 0.02	0.99 $\pm$ 0.02				
MPV <sub>media</sub> ( $m \cdot s^{-1}$ )	0.96 $\pm$ 0.03	0.98 $\pm$ 0.03	0.97 $\pm$ 0.02	0.98 $\pm$ 0.02	0.97 $\pm$ 0.02	0.97 $\pm$ 0.02	0.97 $\pm$ 0.02	0.97 $\pm$ 0.02				
PV (%)	39.6 $\pm$ 11.1 <sup>§§§§</sup>	55.3 $\pm$ 12.2 <sup>§§§§††††</sup>	36.2 $\pm$ 12.4 <sup>§§§†††</sup>	50.4 $\pm$ 10.9 <sup>§§§†††††</sup>	28.1 $\pm$ 10.1 <sup>†</sup>	36.9 $\pm$ 10.9 <sup>†††</sup>	20.0 $\pm$ 7.9	26.8 $\pm$ 5.7 <sup>*</sup>				

1RM: Una repetición máxima; PB: Press de banca; SQ: Sentadilla completa; PV: Pérdida de velocidad; VMP<sub>mejor</sub>: Velocidad media propulsiva de la repetición más rápida de la serie (normalmente la primera repetición); VMP<sub>media</sub>: Promedio de la VMP de las 3 repeticiones.

Diferencias estadísticamente significativas con respecto a 70% 1RM: <sup>§§§</sup>  $p < 0.001$ ; Diferencias estadísticamente significativas con respecto a 80% 1RM: <sup>†</sup>  $p < 0.05$ , <sup>††</sup>  $p < 0.001$ . Diferencias estadísticamente significativas con respecto a SQ: <sup>\*</sup>  $p < 0.05$ ; <sup>\*\*\*</sup>  $p < 0.05$





**Figura 19.** Relación entre la pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y la intensidad relativa (**A**) y la pérdida de VMP dentro de la serie (**B**). Diferencias significativas entre ambos ejercicios: \*  $p < 0.05$ ; \*\*\*  $p < 0.001$ ; Diferencias significativas con respecto al 80% 1RM: #  $p < 0.05$ , ###  $p < 0.001$ ; Diferencias significativas con respecto al 70% 1RM: †††  $p < 0.001$ .

Para poder estudiar si la pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  producida después de cada test de MNR con las distintas intensidades relativas dependía del número de repeticiones realizado, se ordenaron los participantes en función del número de repeticiones realizado y se dividió a los 20 participantes en 2 grupos (GBR y GAR) de 10

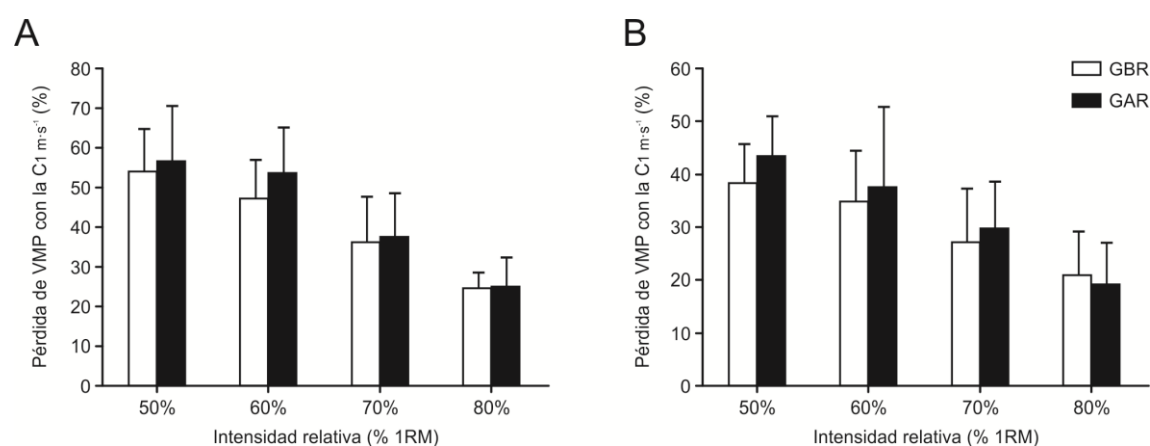
participantes cada uno de ellos. Esto fue realizado para cada una de las intensidades relativas utilizadas en el estudio. En la **Tabla 15** aparece el número medio de repeticiones realizado para cada grupo. No se encontraron diferencias significativas en el promedio de pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  para ninguna de las intensidades relativas utilizadas en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa (**Figura 20**).

**Tabla 15.** Número de repeticiones realizado por cada grupo (GBR vs. GAR) ante cada una de las intensidades relativas utilizadas.

Intensidad (% 1RM)	PB		SQ	
	GBR (n = 10)	GAR (n = 10)	GBR (n = 10)	GAR (n = 10)
<b>50% 1RM</b>	21.2 ± 1.2	29.2 ± 5.1 ***	17.7 ± 2.0	29.0 ± 7.1 ***
<b>60% 1RM</b>	16.9 ± 1.2	21.7 ± 1.5 ***	12.5 ± 1.6	19.9 ± 4.5 ***
<b>70% 1RM</b>	10.7 ± 1.3	13.9 ± 2.0 ***	7.2 ± 1.1	12.0 ± 2.9 ***
<b>80% 1RM</b>	6.6 ± 1.0	8.8 ± 1.0 ***	4.8 ± 0.6	7.1 ± 1.3 ***

PB: Press de banca; SQ: Sentadilla completa; 1RM: Una repetición máxima; GBR: Grupo de menor número de repeticiones; GAR: Grupo de mayor número de repeticiones.

Diferencias entre grupos: \*\*\*  $p < 0.001$ .



**Figura 20.** Pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  después de cada uno de los test de MNR en cada uno de los grupos formados en función del número de repeticiones realizado (GBR vs. GAR) para el ejercicio de press de banca (A) y sentadilla completa (B).

### 4.6.3. Discusión

El principal objetivo de este estudio fue comparar la pérdida de VMP durante y después de una serie realizada hasta el fallo muscular con 4 intensidades relativas diferentes (50, 60, 70 y 80% 1RM) en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa. Nuestros resultados indican que (1) hubo una fuerte relación entre la pérdida de VMP durante la serie y el porcentaje de repeticiones realizado ante todas las intensidades relativas utilizadas en ambos ejercicios; (2) el porcentaje de repeticiones realizado durante una serie hasta el fallo muscular cuando se alcanza una determinada pérdida de VMP (desde el 15% al 65%) fue menor para el ejercicio de press de banca en comparación con el ejercicio de sentadilla completa en todas las intensidades relativas usadas en este estudio; (3) la fatiga aguda (medida como el porcentaje de cambio en la VMP alcanzada con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$ ) después de una serie hasta el fallo muscular descendió a medida que aumentó la intensidad relativa (% 1RM) utilizada en ambos ejercicios, aunque el grado de fatiga fue mayor en el ejercicio de press de banca que en el de sentadilla completa para todas las intensidades relativas; y (4) la pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  alcanzada después de cada test de MNR (en ambos ejercicios) fue independiente del número de repeticiones realizado por cada participante ante cada intensidad relativa. Al igual que en el **Estudio I.1**, estos resultados proporcionan información práctica relevante para la programación y control del volumen de entrenamiento en dos ejercicios de fuerza muy utilizados durante los programas de entrenamiento como son el press de banca y la sentadilla completa, ya que, mediante el control de la velocidad de cada repetición durante el entrenamiento de fuerza, podemos controlar el *grado de esfuerzo* real realizado (González-Badillo, et al., 2011; González-Badillo et al., 2016; Pareja-Blanco et al., 2016a; Pareja-Blanco et al., 2016b; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011).

#### **Características de los tests de MNR**

Para poder analizar y comparar la pérdida de VMP intra- y entre-intensidades es importante que todos los participantes realicen los tests de MNR con la misma intensidad relativa (% 1RM). Para esto, en diversos estudios (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, García-Pallarés, Pérez, Fernandes, & González Badillo, 2011; Sánchez-Medina, et al., 2014; Sánchez-Medina,

et al., 2017) se ha concluido que la intensidad relativa durante el entrenamiento de fuerza se debería controlar a través de la velocidad de ejecución, la cual está estrechamente relacionada con el porcentaje de 1RM, en vez de calcularse como un porcentaje del máximo peso levantado en un test incremental (para más detalle ver **Apartado 3.1.1**). Sin embargo, los estudios en los que se ha analizado el descenso de la velocidad durante una serie hasta el fallo muscular ante diferentes intensidades relativas (Haff et al., 2003; Iglesias, Boullosa, Dopico, & Carballeira, 2010; Izquierdo et al., 2006) no se controló la velocidad de la primera repetición para determinar la intensidad del ejercicio, lo cual no nos permite saber si todos los participantes realizaron el test con la misma intensidad relativa. Por tanto, para nuestro conocimiento, este estudio constituye la primera aproximación al análisis de la pérdida de VMP durante y después de un test de MNR en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa, con la particularidad de que la intensidad relativa fue determinada a través de la velocidad de ejecución de la primera repetición ( $\pm 0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $\pm 0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para los ejercicios de press de banca y sentadilla completa, respectivamente) en el momento de realizar cada test (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2011).

El control de la velocidad de desplazamiento de la barra en cada repetición nos permitió comprobar también que todos los tests de MNR fueron realizados hasta el fallo muscular, tanto en el ejercicio de press de banca ( $\sim 0.14 - 0.12 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) como en el de sentadilla completa ( $\sim 0.29 - 0.26 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), debido a que durante este tipo de esfuerzos, independientemente de la intensidad relativa y el ejercicio utilizado, la VMP de la última repetición de la serie se corresponde con la  $VMP_{1RM}$  ( $0.14 \pm 0.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $0.31 \pm 0.04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para los ejercicios de press de banca y sentadilla completa, respectivamente) (Duffey & Challis, 2007; Izquierdo, et al., 2006; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011).

Por otro lado, nuestros resultados mostraron que, ante la misma intensidad relativa, los participantes realizaron un mayor número de repeticiones durante el ejercicio de press de banca que durante la sentadilla completa. Este hecho podría deberse a varios factores como: (1) un mayor grado de fatiga asociado con cada repetición para la sentadilla completa en comparación con el press de banca, ya que el desplazamiento (y el tiempo bajo tensión) durante la sentadilla completa es mayor, además de que implica la activación de más y mayores grupos musculares que el ejercicio de press de banca; (2)

el mayor porcentaje de pérdida de VMP que se puede alcanzar durante una serie hasta el fallo muscular en el ejercicio de press de banca (73.9 - 84.8%) comparado con el de sentadilla completa (60.2 - 75.5%), lo cual está asociado directamente con la  $VMP_{1RM}$  (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011); y (3) la pausa (~1.5 s) impuesta entre la fase excéntrica y concéntrica de cada repetición en el ejercicio de press de banca, la cual podría permitir un ligero grado de recuperación, y poder así realizar un mayor número de repeticiones que en el ejercicio de sentadilla completa. En contra de nuestros resultados, otros estudios (Izquierdo, et al., 2006) han mostrado mayor número de repeticiones para el ejercicio de sentadilla completa que para el press de banca ante diferentes intensidades relativas (60, 65, 70 y 75% 1RM). Estas diferencias podrían ser debidas a que en el estudio llevado a cabo por Izquierdo et al. (2006) usaron el ejercicio de media sentadilla, lo cual implica un menor desplazamiento, menor tiempo bajo tensión y, consecuentemente, menor fatiga en cada repetición que la sentadilla completa.

### ***Pérdida de VMP durante la serie***

El porcentaje de pérdida de VMP y el porcentaje de repeticiones realizado mostró una alta correlación para las 4 intensidades relativas estudiadas en los ejercicios de press de banca ( $R^2 = 0.97$  para todas las intensidades relativas) y sentadilla completa ( $R^2 = 0.93$  para todas las intensidades relativas), independientemente del número de repeticiones realizado por cada participante (**Figura 18**). Estos resultados están en concordancia con los datos mostrados en el **Estudio I.1**, a pesar de que los participantes en uno y otro estudio fueron diferentes. Uno de los aspectos novedosos del presente estudio con respecto al **Estudio I.1** es la aportación de las ecuaciones para calcular el porcentaje de repeticiones realizado, y las que se quedan sin hacer, cuando se alcanza una determinada magnitud de pérdida de velocidad en la serie para el ejercicio de sentadilla completa (**Figura 18**). Estas ecuaciones nos permiten conocer con gran precisión y de forma inmediata, mediante su implementación en cualquier software de medición de velocidad, qué porcentaje de repeticiones se ha realizado tan pronto como se detecte un determinado valor de pérdida de velocidad en la serie. Por tanto, los resultados de este estudio refuerzan las conclusiones del **Estudio I.1** en las que se indica que el volumen de entrenamiento durante los ejercicios de fuerza se debería controlar a través de la pérdida

de velocidad en la serie. De este modo, cada serie de entrenamiento termina cuando se alcanza un determinado valor de pérdida de velocidad (el cual debería ser programado previamente), en vez de realizar un número fijo de repeticiones en cada serie y para cada intensidad relativa.

Uno de los hallazgos más importantes de este estudio fue que el porcentaje de repeticiones realizado ante un porcentaje de pérdida de velocidad determinado depende de la intensidad relativa y del ejercicio utilizado. De acuerdo con los resultados encontrados en el **Estudio I.1**, el presente estudio mostró que los porcentajes de repeticiones realizados para las diferentes pérdidas de velocidad analizadas (desde el 10% al 65%) fueron muy similares para las intensidades relativas del 50, 60 y 70% 1RM, mientras que esos porcentajes de repeticiones fueron ligeramente superiores para el 80% 1RM (**Tabla 13**). A diferencia del press de banca, en la sentadilla completa, el porcentaje de repeticiones realizado en cada serie hasta el fallo cuando la magnitud de pérdida de velocidad osciló entre 10% y 65% fue similar sólo para las intensidades del 50% y el 60% 1RM. Sin embargo, para las intensidades del 70% y 80% 1RM, el porcentaje de repeticiones realizado para un mismo porcentaje de pérdida de velocidad en la serie fue progresivamente mayor (**Tabla 13**). Estos resultados están parcialmente en contra de los mostrados por Izquierdo et al. (2006). Estos autores indicaron que el porcentaje de repeticiones realizado cuando se alcanza un determinado valor de pérdida de velocidad en la serie fue similar para todas las intensidades evaluadas (60% - 75% 1RM) en ambos ejercicios (press de banca y sentadilla completa). Estas discrepancias podrían deberse a las diferencias metodológicas que existen entre ambos estudios, como son: (1) el control de la velocidad de la primera repetición de la serie para la determinación de la intensidad relativa; (2) el uso de diferentes ejercicios (media sentadilla vs. sentadilla completa); (3) la forma de realizar el ejercicio de press de banca (sin parar vs. imponiendo una pausa entre la fase excéntrica y concéntrica del movimiento); y (4) la velocidad de levantamiento de la carga en cada repetición (controlada a través de un metrónomo vs. a la máxima velocidad posible).

Cuando se compararon ambos ejercicios, el porcentaje de repeticiones realizado ante el mismo porcentaje de pérdida de VMP en la serie fue mayor en el ejercicio de sentadilla completa que en el press de banca en las 4 intensidades relativas evaluadas (**Tabla 13**). Como mencionamos anteriormente, este hecho podría deberse al menor rango de pérdida de VMP que se puede alcanzar en el ejercicio de sentadilla completa, en

relación con el de press de banca, durante una serie realizada hasta el fallo muscular con cualquier intensidad relativa, lo cual está relacionado directamente con la VMP asociada a cada porcentaje de 1RM y la VMP de la RM de cada ejercicio, la cual es mayor en la sentadilla completa que en el press de banca (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Así, aunque el porcentaje de pérdida de velocidad por repetición fue ligeramente superior en el ejercicio de sentadilla completa (3.5, 4.9, 7.4 y 10.7%, para las intensidades de 50, 60, 70 y 80% 1RM, respectivamente) que en el de press de banca (3.5, 4.4, 6.3 y 9.9%, para las intensidades de 50, 60, 70 y 80% 1RM, respectivamente), lo cual indicaría que para una misma pérdida de velocidad en la serie, se necesitaría realizar un mayor número de repeticiones en el ejercicio de press de banca que en el de sentadilla completa, las diferencias en el número de repeticiones realizado ante cada intensidad relativa en el ejercicio de press de banca comparado con el de sentadilla completa fueron proporcionalmente mayores (7.1 - 22.1%) a las diferencias en el porcentaje de pérdida de velocidad asociado con cada repetición (0 - 11.4%). Por tanto, y, consecuentemente, para una misma pérdida de VMP en la serie, el porcentaje de repeticiones realizado es mayor para el ejercicio de sentadilla completa que para el press de banca. Además de esto, un análisis más detallado de los resultados parece indicar que: 1) para cada intensidad relativa, las diferencias en el porcentaje de repeticiones realizado entre ambos ejercicios fueron mayores a medida que incrementó la magnitud de pérdida de VMP en la serie; y 2) estas diferencias en los porcentajes de repeticiones realizados entre el ejercicio de press de banca y sentadilla completa fueron mayores a medida que incrementó la intensidad relativa con la que se realizó el test de MNR (**Tabla 13; Figura 18**). Por tanto, estos resultados parecen indicar que la programación del volumen de entrenamiento en ejercicios de fuerza a través de la pérdida de velocidad en la serie debería ser específica para cada ejercicio y para cada intensidad relativa utilizada. En este sentido, para poder realizar el mismo porcentaje de repeticiones en ambos ejercicios utilizados en el presente estudio, los participantes deberían alcanzar una mayor magnitud de pérdida de VMP en la serie en el press de banca que en la sentadilla completa. De acuerdo con los resultados obtenidos en el presente estudio, estos porcentajes de pérdida de velocidad dependerán de la intensidad relativa utilizada, y son los siguientes: ~5, ~6, ~8 y ~7%, para las intensidades del 50, 60, 70 y 80% 1RM, respectivamente.

**Fatiga mecánica aguda**

Dado que la fatiga se ha definido como la incapacidad de mantener un nivel de fuerza esperado o requerido (Enoka & Duchateau, 2008; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), y que la velocidad depende directamente de la fuerza aplicada, la pérdida de velocidad que se produce con la  $C1m \cdot s^{-1}$  se puede considerar como una buena expresión de la fatiga neuromuscular inducida por un ejercicio (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016a; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). En el presente estudio, el porcentaje de pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  disminuyó progresivamente en ambos ejercicios a medida que aumentaba la intensidad relativa con la que se realizó el test de MNR (**Tabla 14; Figura 19A**). Este comportamiento es similar a la pérdida de VMP alcanzada en la serie. De hecho, se encontró una alta correlación (**Figura 19B**) entre estas dos variables (pérdida de VMP en la serie y pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$ ) tanto el ejercicio de press de banca ( $r = 0.930$ ;  $p < 0.001$ ) como en el de sentadilla completa ( $r = 0.989$ ;  $p < 0.001$ ). Por tanto, parece que cuanto mayor es la pérdida de VMP que se puede alcanzar dentro de la serie, mayor es el grado de fatiga inducido por el ejercicio. Estos resultados están de acuerdo con los mostrados previamente por Sánchez-Medina & González-Badillo (2011), quienes compararon también la magnitud de pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  después de realizar series hasta el fallo con diferentes intensidades relativas ( $\sim 70$ ,  $\sim 75$ ,  $\sim 80$ ,  $\sim 85$  y  $\sim 90\%$  1RM), aunque en este estudio, las intensidades se determinaron por un número de repeticiones posibles en la serie y no por la velocidad de la primera repetición.

Por último, otro hallazgo importante del presente estudio fue que el promedio de pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  fue similar entre aquellos participantes que realizaron un mayor y un menor número de repeticiones durante los tests de MNR en ambos ejercicios (**Figura 20**). Esto quiere decir que, ante una misma intensidad relativa, el grado de fatiga está determinado por el porcentaje de pérdida de velocidad alcanzado dentro de la serie y no por el número de repeticiones que se realizan para alcanzar dicho nivel de pérdida de velocidad en la serie. Esta afirmación viene reforzada por el hecho de que la media de las repeticiones realizadas por el grupo que más repeticiones hizo en la serie fue un 22-27% y un 32-40% superior a la media del grupo que hizo menos repeticiones en el press de banca y en la sentadilla completa, respectivamente. Por tanto, tomados de manera conjunta, los resultados de este estudio enfatizan la validez de usar el porcentaje de pérdida de VMP dentro de la serie como un indicador objetivo de la



fatiga neuromuscular producida durante el ejercicio de fuerza, independientemente del número de repeticiones que pueda ser realizado por cada individuo.



#### 4.6.4. Conclusiones

Las principales conclusiones del **Estudio I.3** fueron las siguientes:

- El número de repeticiones medio y la pérdida de VMP durante la serie fueron mayores para el ejercicio de press de banca comparado con el de sentadilla completa en las 4 intensidades relativas analizadas.
- Existe una alta relación entre la magnitud de pérdida de VMP en la serie y el porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo que puede completar para todas las intensidades relativas analizadas en ambos ejercicios, press de banca y sentadilla completa.
- El porcentaje de repeticiones realizado cuando se alcanza un determinado valor de pérdida de VMP en la serie (desde el 10% al 65%) fue mayor en el ejercicio de sentadilla completa que en el de press de banca en todas las intensidades relativas utilizadas.
- Ante una misma intensidad relativa, la fatiga aguda (medida a través de la pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$ ) depende del porcentaje de pérdida de VMP en la serie, no del número de repeticiones realizado en la misma. Por tanto, el grado de fatiga inducido por la realización de una serie hasta el fallo muscular con las 4 intensidades relativas analizadas en el presente estudio fue independiente del número de repeticiones realizado por cada participante.



#### 4.6.5. Aplicaciones Prácticas

Dada la fuerte relación entre la pérdida de VMP en la serie y el porcentaje de repeticiones realizado, independientemente del número de repeticiones totales realizado por cada individuo, los entrenadores y profesionales del acondicionamiento físico deberían considerar el uso de la magnitud de pérdida de velocidad en cada serie de entrenamiento para controlar el volumen de entrenamiento y el grado de fatiga generado durante el entrenamiento de fuerza de fuerza. En este sentido, se debería configurar el volumen de entrenamiento durante cada serie de entrenamiento en función de una determinada pérdida de VMP permitida (expresada como porcentaje de pérdida de velocidad en la serie con respecto a la VMP más alta alcanzada en cada serie), en lugar de programar la realización de un número determinado de repeticiones en cada serie y con cada intensidad relativa.

Esta nueva metodología de control del volumen de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza nos permite: (1) determinar el grado o *nivel de esfuerzo* realizado por un individuo durante cada serie; (2) igualar el *nivel de esfuerzo* realizado por cada individuo durante el entrenamiento de fuerza. El porcentaje de pérdida de VMP debería establecerse previamente en función del objetivo específico del entrenamiento, el ejercicio que se vaya a realizar, la experiencia previa del sujeto en el entrenamiento de fuerza y el nivel de fuerza del deportista.

Además, las diferencias encontradas en el porcentaje de repeticiones realizado para cada porcentaje de pérdida de VMP analizado entre las distintas intensidades relativas y los diferentes ejercicios usados en el presente estudio, indican que se deberían tener en cuenta también estos factores (*intensidad relativa y tipo de ejercicio*) cuando se prescribe el volumen de entrenamiento a través de la pérdida de VMP en cada serie.



## **5. Estudio II:**

***Efecto agudo producido por distintos tipos de esfuerzo muscular determinados por la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad dentro de cada serie sobre la respuesta mecánica, el estrés hormonal y los cambios en la actividad eléctrica muscular***







## **5. Estudio II: Efecto agudo producido por distintos tipos de esfuerzo muscular determinados por la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad dentro de cada serie sobre la respuesta mecánica, el estrés hormonal y los cambios en la actividad eléctrica muscular**

### **5.1. Planteamiento del Problema y Propósito de la Investigación**

Diseñar un programa de entrenamiento de fuerza es un proceso complejo en el que intervienen multitud de factores internos y externos, y en el que es preciso controlar y manipular adecuadamente las diferentes variables que definen el estímulo de entrenamiento, las cuales tiene una gran influencia sobre el tipo y magnitud de respuesta aguda de los sistemas neural, endocrino y músculo-esquelético, y consecuentemente, sobre las adaptaciones neuromusculares a largo plazo (Bird, et al., 2005; Hoppeler, 2016; Spiering et al., 2008; Toigo & Boutellier, 2006). Por tanto, conocer los aspectos mecánicos y fisiológicos que subyacen a los diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza es fundamental para mejorar nuestra comprensión sobre los procesos *causantes* de los cambios en el rendimiento neuromuscular (Crewther, et al., 2005; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011).

Tradicionalmente, en la mayoría de los estudios relacionados con el análisis de la respuesta física y fisiológica aguda después de un entrenamiento de fuerza se han usado protocolos de entrenamiento en los que se realizaban el máximo número de repeticiones posible en cada serie (Ahtiainen & Hakkinen, 2009; Ahtiainen, et al., 2003, 2004; Hakkinen, 1995; Kraemer, 1988; Kraemer et al., 1991; Kraemer et al., 1999; Kraemer et al., 1990; Kraemer, Noble, Clark, & Culver, 1987; Ruotsalainen, Ahtiainen, Kidgell, & Avela, 2014; Walker, et al., 2004; Walker, Taipale, Nyman, Kraemer, & Hakkinen, 2011). Sin embargo, estudios más recientes (González-Badillo et al., 2016; Gorostiaga, et al., 2012; Gorostiaga et al., 2014; Gorostiaga, et al., 2012; Pareja-Blanco et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) han profundizado en el conocimiento del significado fisiológico del *Carácter del Esfuerzo* y se han centrado en comparar el efecto de la manipulación del número de repeticiones realizado en función de las que se

podrían realizar sobre la respuesta mecánica, endocrina, simpática y parasimpática, metabólica y neuromuscular. Aunque estos estudios (González-Badillo, et al., 2016; Gorostiaga, et al., 2012; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) han permitido conocer la importancia de la pérdida de velocidad en la serie como indicador de la fatiga neuromuscular producida por el ejercicio de fuerza, los esfuerzos analizados en estos trabajos fueron programados en función de la carga (kg) con la que se podía realizar un número determinado de repeticiones máximas. Sin embargo, los recientes hallazgos relacionados con el control de la intensidad y el volumen de entrenamiento exigen nuevos estudios que permitan conocer la fatiga producida por esfuerzos controlados a través de la velocidad de ejecución.

Como hemos comentado en el **Apartado 3.1** de la presente Tesis, las principales variables que definen la carga de entrenamiento de fuerza son la intensidad y el volumen. Por tanto, de la manipulación y el grado de control que tengamos sobre estas variables va a depender en gran medida la respuesta aguda y las adaptaciones producidas por el entrenamiento. En apartados anteriores (**2. Origen de la Problemática Objeto de Estudio** y **3.1.1 Intensidad**) se expone cuáles son los métodos que se han utilizado tradicionalmente para la determinación y expresión de la intensidad durante el entrenamiento de fuerza, se explica extensamente cuáles son los inconvenientes asociados a la prescripción de la intensidad a través de 1RM o XRM, y se indica también, en base a diferentes estudios (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2017), que *la velocidad de ejecución de la primera repetición* de una serie permite determinar de manera instantánea el esfuerzo o intensidad (% 1RM) real que significa el peso con la que se entrena. Esta afirmación queda justificada por la alta relación encontrada entre la VMP y el porcentaje de 1RM, lo cual indica que cada porcentaje de la RM tiene su propia velocidad (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010). Por tanto, se debe utilizar la velocidad de ejecución para programar y controlar objetivamente la intensidad del entrenamiento. De este modo, el peso a levantar (kg) durante cada sesión de entrenamiento se determina por la velocidad de la primera repetición, por lo que, lo que se debe programar no es el porcentaje de 1RM ni un XRM determinado a realizar, sino la velocidad de ejecución de la primera repetición de la serie.

En cuanto al volumen de entrenamiento, los resultados del **Estudio I** parecen indicar que la pérdida de velocidad en la serie es la variable más adecuada para igualar el *grado de*

*esfuerzo o de fatiga* producido durante cada serie de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza. Este método de controlar el volumen de entrenamiento supera las limitaciones presentadas por la prescripción del volumen a través del número de repeticiones a realizar en cada serie de entrenamiento (ya sea llegando hasta el fallo muscular o no), y se basa en la estrecha relación encontrada entre la pérdida de velocidad en la serie y el porcentaje de repeticiones realizado ante diferentes intensidades relativas. Estas relaciones indican que cuando se pierde un determinado porcentaje de VMP en la serie se ha realizado un mismo porcentaje de las repeticiones posibles para todos los sujetos, independientemente del número de repeticiones que se puedan hacer en la propia serie. Así, si controlamos la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad en la serie, tendremos posiblemente la información más precisa que se puede obtener sobre el grado de fatiga que ha experimentado un sujeto durante el entrenamiento de fuerza. De aquí se deduce, por tanto, que el grado de fatiga o de esfuerzo debe quedar definido por un índice el cual incluya ambas variables: VMP de la mejor repetición y pérdida de velocidad.

En este nuevo contexto de *entrenamiento basado en la velocidad* donde la velocidad de ejecución es la variable que permite estimar de manera más objetiva la intensidad y el volumen (*grado de esfuerzo*, como síntesis de ambas variables) de entrenamiento, y como consecuencia se debe tomar como la variable de referencia para la dosificación y el control en el ejercicio de fuerza, y ante la falta de datos experimentales relacionados con los efectos (agudos y crónicos) de la manipulación de estas dos variables (velocidad de la primera repetición y pérdida de velocidad en la serie), se hace necesario la realización de estudios que permitan resolver los siguientes problemas de investigación:

1. ¿Cuál es el grado de fatiga inducido por la realización de diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza determinados por la velocidad de la primera repetición y por la pérdida de velocidad dentro de la serie?
2. ¿Difiere la respuesta mecánica y fisiológica aguda entre esfuerzos realizados con la misma pérdida de velocidad en la serie pero con distintas intensidades relativas?
3. ¿Existen diferencias en la respuesta mecánica y fisiológica aguda producida por esfuerzos programados en base a la velocidad de ejecución en diferentes ejercicios?

4. ¿Existe relación entre la fatiga mecánica, el estrés metabólico y los cambios en la actividad eléctrica muscular producidos por diferentes protocolos de entrenamiento determinados por la velocidad de la primera repetición y por la pérdida de velocidad dentro de la serie?
  
5. ¿Es el producto de la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad en la serie un indicador válido para determinar el *grado de esfuerzo* (fatiga) inducido durante el entrenamiento de fuerza?

## 5.2. Objetivos de la Investigación

De los problemas planteados anteriormente se derivan los siguientes objetivos:

1. Determinar el grado de pérdida de velocidad con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  después de 16 protocolos de entrenamiento de fuerza determinados por la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad dentro de la serie en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.
2. Examinar el estrés metabólico (a través de la concentración sanguínea de lactato) de los 16 esfuerzos programados en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.
3. Determinar el grado de fatiga producido por cada uno de los 16 esfuerzos programados a través de la pérdida de la altura de salto con contramovimiento (CMJ), el cambio en el tiempo en recorrer 20 m y los cambios en la actividad eléctrica muscular en el ejercicio de sentadilla completa.
4. Comparar la fatiga mecánica y el estrés metabólico producido por los 16 protocolos de entrenamiento entre los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.
5. Analizar las posibles relaciones entre el *índice de esfuerzo* (producto de la velocidad de la primera repetición de la serie por la pérdida de velocidad media de la sesión) y la pérdida de velocidad con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$ , la pérdida de altura de salto, la concentración sanguínea de lactato y los cambios en el tiempo en recorrer 20 m y la actividad eléctrica muscular.
6. Estudiar las posibles relaciones entre las variables mecánicas y fisiológicas utilizadas para estimar la fatiga neuromuscular tras los 16 protocolos de entrenamiento de fuerza.



### 5.3. Hipótesis

Las investigaciones que han analizado el estrés producido por diferentes sesiones de entrenamiento de fuerza han utilizado protocolos de esfuerzo basados en el número de repeticiones realizado con respecto a las repeticiones posibles (fallo o no fallo muscular) ante una carga determinada. Por una parte, estos estudios han indicado que el estrés mecánico, metabólico, hormonal y neuromuscular aumenta a medida que incrementa el número de repeticiones realizado con respecto a las que se pueden completar con una carga determinada (González-Badillo et al., 2016; Gorostiaga et al., 2012a; Gorostiaga et al., 2012b; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Por otra parte, aquellos estudios que utilizaron protocolos de entrenamiento de fuerza en los que el número de repeticiones realizado era igual a las repeticiones realizables (*carácter del esfuerzo máximo*), la respuesta metabólica y hormonal a estos entrenamientos presentaron una relación positiva con el número de repeticiones realizadas (Hoffman et al., 2003; Kraemer et al., 1990; McCaulley et al., 2009; Pareja-Blanco, 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011; Smilios, et al., 2003; Zafeiridis, Smilios, Considine, & Tokmakidis, 2003). Dado que, como se ha mostrado en algunos estudios, incluidos todos los relacionados con el **Estudio I** de la presente Tesis, a medida que aumenta el número de repeticiones realizado durante una serie con una intensidad relativa determinada incrementa la pérdida de velocidad, y que, cuanto menor es la intensidad relativa utilizada mayor es el número de repeticiones que hay que realizar para alcanzar una misma pérdida de velocidad en la serie, es probable que exista una relación entre las variables indicadoras de la fatiga y la pérdida de velocidad en la serie. Por ello, nos planteamos las siguientes hipótesis:

**Hipótesis 1:** *La pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$ , la pérdida de altura de salto, la concentración sanguínea de lactato y los cambios en el tiempo en recorrer 20 m y la EMG tienden a aumentar a medida que incrementa la pérdida de velocidad dentro de la serie ante una misma intensidad relativa.*

**Hipótesis 2:** *Ante una misma pérdida de velocidad en la serie, cuanto menor sea la intensidad relativa utilizada, mayor es el estrés mecánico, metabólico y neuromuscular*

Como hemos comentado anteriormente, las variables más importantes a tener en cuenta para conocer el grado de estrés y las posibles adaptaciones producidas por el entrenamiento de fuerza son la intensidad y el volumen (Bird, et al., 2005; Fry, 2004; González-Badillo & Ribas, 2002; Spiering et al., 2008; Toigo & Boutellier, 2006). Por una parte, se ha comprobado que la forma más precisa de cuantificar y controlar objetivamente la intensidad del entrenamiento de fuerza es la velocidad de la primera repetición, ya que se ha observado una estrecha relación entre la velocidad de ejecución y el porcentaje de 1RM utilizado (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2017).

Por otra parte, en estudios previos llevados a cabo por nuestro grupo de investigación (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), se ha observado que cuando se entrena con cargas (kg) con las que se puede hacer un número máximo de repeticiones en la serie comprendido entre ~12 - 4 y se realizan esfuerzos que van desde el 50% de las repeticiones posibles hasta el máximo de repeticiones posible en cada serie de entrenamiento, la pérdida de velocidad media de cada sesión mostró una estrecha relación con el grado de fatiga, el cual fue estimado a través de la pérdida de velocidad ante una misma carga absoluta, la pérdida de altura de salto y los cambios hormonales. Estas relaciones fueron casi perfectas dentro de cada carga analizada (12, 10, 8, 6, 4 RM), pero también fueron muy altas cuando se consideraron todos los esfuerzos conjuntamente (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Eso quiere decir que, cuando se determina la intensidad a través del número máximo de repeticiones posibles que se pueden realizar con una carga (kg) determinada (entre 12 y 4 RM), la pérdida de velocidad en la serie estima de manera notablemente precisa la fatiga generada en la serie.

De los resultados anteriores se deduce que la definición y cuantificación del carácter del esfuerzo o grado de esfuerzo durante el entrenamiento de fuerza se expresa de la manera más completa y precisa por el valor de la velocidad de la primera repetición (*intensidad relativa*) y por el valor de la pérdida de velocidad en la serie (*volumen*), dado que ambas variables influyen de manera notable en el grado de estrés inducido por el entrenamiento de fuerza (González-Badillo, et al., 2016; González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina &



González-Badillo, 2011; Spiering, et al., 2008; Toigo & Boutellier, 2006). Por tanto, es probable que el producto de la velocidad de la primera repetición en la serie y la pérdida de velocidad en la serie ofrezca un índice con alta validez como predictor del grado de esfuerzo que ha significado una serie o una sesión de entrenamiento. Por ello, proponemos la siguiente hipótesis:

***Hipótesis 3:*** *Existe una alta relación lineal entre el resultado de multiplicar el valor de la velocidad de la primera repetición (mayor velocidad en la serie) de una serie y la pérdida de velocidad en la propia serie y los cambios pre-post esfuerzo en las variables mecánicas, metabólicas y neuromusculares estimadoras del grado de fatiga producido por cada protocolo de entrenamiento de fuerza.*

Tradicionalmente, se ha definido la fatiga como la disminución involuntaria e inevitable de la fuerza aplicada durante o después de un esfuerzo, o la diferencia entre la respuesta contráctil que se anticipa o espera y la que se consigue ante una carga determinada (Allen, et al., 2008; Edwards, 1983; Enoka & Duchateau, 2008; Westerblad & Allen, 2002). Dado que la velocidad a la que se desplaza un objeto depende directamente de la fuerza aplicada (González-Badillo & Ribas, 2002), podríamos decir que la fatiga se manifiesta de manera directa, y por tanto se puede expresar de manera muy precisa, por la disminución de la velocidad de movimiento ante una misma carga. En este sentido, en varios trabajos se ha observado que además de la reducción en la producción de fuerza, otro aspecto del rendimiento muscular que se ve notablemente afectado por la fatiga es la velocidad de acortamiento muscular (Allen, et al., 2008; Enoka & Duchateau, 2008), y que existe una alta relación entre la pérdida de velocidad dentro de serie y la pérdida de velocidad ante una carga determinada (Pareja-Blanco, 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Si, además, el estrés metabólico es una expresión del grado de esfuerzo realizado ante una misma intensidad (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016) y la pérdida de velocidad post-esfuerzo es un indicador de fatiga (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016) y, a su vez, la fatiga se debe, en parte, a un deterioro en las funciones neurales (Enoka et al., 2011; MacIntosh & Rassier, 2002), es probable que la pérdida de velocidad post-esfuerzo, independientemente del ejercicio en el que se

mida, tenga relación con el estrés metabólico y los cambios en la actividad eléctrica muscular. Por ello, formulamos la siguiente hipótesis:

***Hipótesis 4:*** *Las pérdidas de velocidad con la  $C1m \cdot s^{-1}$ , de altura de salto y de velocidad durante una carrera de 20 m presentan relaciones significativas entre ellas y con los cambios en la concentración de lactato y las variables EMG de los músculos implicados en el movimiento.*

Algunos de los factores que determina el grado de fatiga generado por un esfuerzo son la magnitud de los grupos musculares y el tipo de fibra de dichos grupos musculares implicados en el movimiento. Así, parece que después de un esfuerzo de características similares (intensidad y volumen), la fatiga (estimada a través de los cambios en la fuerza, la velocidad y la potencia) es mayor en ejercicios que involucran grupos musculares más pequeños (Cheng & Rice, 2005, 2009) (ver también los resultados del **Estudio I.3** de la presente Tesis). Del mismo modo, se ha observado que aquellos ejercicios que involucren grupos musculares con mayor proporción de fibras tipo II muestran mayores descensos de fuerza, velocidad y potencia después de un esfuerzo (Hamada, Sale, MacDougall, & Tarnopolsky, 2003). Sin embargo, cuanto mayor es la masa muscular implicada en el movimiento, mayor es la demanda de energía necesaria para realizar la actividad y por tanto, mayor tenderá a ser la cantidad de metabolitos de desecho (lactato) generados por el metabolismo anaeróbico. Dado que los músculos implicados en el ejercicio de press de banca son menores a los de la sentadilla completa, y que se ha demostrado que los miembros superiores poseen una mayor proporción de fibras tipo II en relación con los miembros inferiores (Mygind, 1995; Sanchis-Moysi et al., 2010), nos planteamos la siguiente hipótesis:

***Hipótesis 5:*** *Las pérdidas de velocidad con la  $C1m \cdot s^{-1}$  serán mayores en los protocolos de entrenamiento de fuerza realizados en el ejercicio de press de banca, mientras que la concentración sanguínea de lactato será mayor en los protocolos de entrenamiento de fuerza realizados en el ejercicio de sentadilla completa.*

## 5.4. Metodología

### A. Tipo de Investigación

Dadas las características de los datos, el **Estudio II** es una investigación *cuantitativa*. Por el grado de manipulación de las variables y los objetivos del estudio, nuestra investigación es fundamentalmente *descriptiva*, aunque podemos considerar las variables *velocidad de la primera repetición* y *pérdida de velocidad en la serie* como independientes. Por el enfoque del análisis de los datos, la investigación es en parte *inferencial* con las variables independientes atributivas indicadas y en parte *correlacional*. Por último, la investigación es de carácter fundamentalmente *transversal*, ya que analizamos la relación entre los datos sincrónicamente, en un momento determinado.

### B. Muestra

En este estudio participaron 21 hombres sanos y físicamente activos los cuales fueron divididos en dos grupos: uno que realizó los esfuerzos en el ejercicio de sentadilla completa ( $n = 11$ ) y otro que realizó los esfuerzos en el ejercicio de press de banca ( $n = 10$ ). Las características de los participantes aparecen en la **Tabla 16**. Todos eran estudiantes del Grado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte con al menos 6 meses de experiencia previa en el entrenamiento de fuerza. Además, estaban familiarizados con los ejercicios de press de banca y sentadilla completa porque habían participado previamente en algunas evaluaciones y tests con nuestro grupo de trabajo. Tras ser informados del propósito de la investigación y los procedimientos experimentales, todos los participantes dieron su consentimiento por escrito, firmando el documento de Consentimiento Informado (**ANEXO I**) antes de tomar parte en el estudio.

Los requisitos necesarios para participar en este estudio han sido descritos previamente en la metodología del **Estudio I.1**. (Apartado 4.4.1.B).

**Tabla 16.** Características físicas descriptivas de los participantes en el Estudio II.

Variable	Sentadilla completa (n = 11)	Press de banca (n = 10)
Edad (años)	23.8 ± 3.6	22.6 ± 3.1
Masa corporal (kg)	74.2 ± 12.3	77.2 ± 14.5
Talla (m)	1.77 ± 0.07	1.76 ± 0.08
1RM <sub>est</sub> (kg)	111.5 ± 14.2	76.6 ± 22.2

1RM<sub>est</sub>: Una repetición máxima estimada

### C. Diseño del Estudio

El presente estudio se diseñó para analizar la respuesta aguda ante 16 protocolos de entrenamiento de fuerza (PEF) determinados por la velocidad de la primera repetición y por la pérdida de velocidad dentro de la serie. En las dos semanas anteriores a la realización de los tests, se llevaron a cabo 4 sesiones de familiarización (2 sesiones por semana) que consistieron en la realización de varias series de entrenamiento (en el ejercicio de press de banca o sentadilla completa, según el grupo asignado) ejecutando cada repetición a la máxima velocidad posible. Durante estas sesiones de familiarización, los participantes eran informados en tiempo real de la velocidad a la que estaban realizando cada repetición. En la última sesión de familiarización, los participantes llevaron a cabo un test isoinercial de cargas progresivas (en sentadilla completa o press de banca, según el grupo asignado) para conocer la relación fuerza/carga - velocidad y la 1RM<sub>est</sub>. Después de las evaluaciones iniciales, cada participante realizó 16 PEF con distintas intensidades y volúmenes. La intensidad relativa se determinó a través de la mayor velocidad (normalmente la primera o segunda repetición) de la primera serie de entrenamiento (VMP<sub>mejor</sub>), mientras que el volumen se cuantificó a través de la pérdida de velocidad dentro de cada serie de entrenamiento. En cada PEF se realizaron siempre 3 series con la intensidad relativa y la pérdida de velocidad programada para cada sesión, con 4 min de recuperación entre series. Los participantes realizaron los 16 PEF de manera aleatoria. Para analizar la respuesta mecánica, metabólica y neural en cada PEF, los participantes llevaron a cabo una batería de medidas antes e inmediatamente después de cada esfuerzo. Para los PEF realizados en el ejercicio de press de banca sólo se midió la concentración sanguínea de lactato y la VMP con la C1m·s<sup>-1</sup>, mientras que para el ejercicio de sentadilla completa se

medió, además de lo anterior, la altura de salto vertical (CMJ), la EMG de superficie durante la realización del test con la  $C1m \cdot s^{-1}$ , y el tiempo en recorrer 10 y 20 m a la máxima velocidad posible. Los PEF se realizaron en días separados con al menos 72 h de recuperación entre cada uno de ellos. Todas las sesiones se realizaron a la misma hora del día ( $\pm 1$  h) para cada participante y bajo las mismas condiciones ambientales ( $\sim 20$ - $22^\circ$  C y 55%-65% de humedad). Durante el tiempo que duró el presente estudio, se le pidió a los sujetos que no realizaran ningún tipo de entrenamiento de fuerza y que no realizaran ningún tipo de ejercicio intenso al menos 24 horas antes de hacer cada PEF.

#### D. Variables Objeto de Estudio

A pesar de que el estudio que planteamos no es estrictamente de carácter experimental, existe una serie de variables que actúan como independientes en la explicación de las variables estudiadas y, por tanto, como tales las debemos considerar. Incluso podemos admitir que en cierta medida manipulamos estas variables, puesto que de utilizar otros valores de las mismas, los resultados obtenidos podrían ser distintos.

Las variables que actúan como independientes son los **16 PEF** determinados por la *mayor velocidad* (conseguida normalmente en la primera o segunda repetición) *de la primera serie de entrenamiento y la pérdida de velocidad en cada serie de entrenamiento* (**Tablas 17 y 18**). Las intensidades que representan las velocidades seleccionadas fueron el 50, 60, 70 y 80% 1RM en ambos ejercicios (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2017). Se eligieron estas 4 intensidades principalmente por dos motivos: (1) porque son de uso habitual en el entrenamiento de fuerza tanto para individuos con poca experiencia como deportista de alto nivel (Rhea, 2004); (2) para intentar analizar la respuesta aguda ante un amplio rango de intensidades. En cuanto a la pérdida de velocidad, en el **Estudio I.3** se mostró que la máxima pérdida de velocidad durante una serie hasta el fallo muscular para las intensidades estudiadas osciló entre el  $\sim 60$  - 75% en el ejercicio de sentadilla completa y el  $\sim 74$  - 85% para el ejercicio de press de banca. Por tanto, seleccionamos 4 pérdidas de velocidad progresivas (10, 20, 30 y 45% para el ejercicio de sentadilla completa; 15, 25, 40 y 55% para el ejercicio de press de banca) que pudieran ser representativas del grado de fatiga generado ante distintos volúmenes de entrenamiento. No se seleccionaron pérdidas de velocidad en la serie superiores porque se ha comprobado en

un reciente estudio (Pareja-Blanco et al., 2016) que utilizar pérdidas de velocidad en la serie del 40% con intensidades que oscilaron entre el 70 - 85% 1RM produjo el fallo muscular en el 56% de las series de entrenamiento. Dado que nosotros queríamos que todos los participantes completaran todas las series de entrenamiento en todas las sesiones para cumplir con el PEF programado, decidimos establecer la pérdida máxima de velocidad en la serie en el 45% y el 55% en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente. La menor pérdida de velocidad en la serie también se estableció en función de los resultados obtenidos en el **Estudio I.3**. En dicho estudio se observó que la pérdida media por repetición con una intensidad relativa del 80% 1RM era del 10% (máxima pérdida de velocidad en la serie: ~60%; número de repeticiones medio: ~6). Por este motivo se estableció la mínima pérdida de velocidad para este estudio en el 10% en el ejercicio de sentadilla completa y del 15% en el ejercicio de press de banca. Una vez establecidas las pérdidas mínima y máxima para cada una de las intensidades, se eligieron otros dos valores de pérdida de velocidad intermedios. Por tanto, la combinación de las 4 intensidades y las 4 pérdidas de velocidad en la serie nos permiten conocer de manera directa el efecto agudo ante 16 PEF diferentes, e inferir el grado de fatiga que se podría generar en protocolos de esfuerzo con intensidades (p.ej., 55, 65, 75% 1RM) y pérdidas de velocidad (p.ej., 15, 25, 35% en el ejercicio de sentadilla completa) intermedias.

**Tabla 17.** Configuración de los esfuerzos realizados en el **Estudio II** para el ejercicio de **sentadilla completa**.

Intensidad (velocidad asociada)	Volumen: S x PV (%)			
~1.13 m·s <sup>-1</sup>	3 x 10% (E1)	3 x 20% (E3)	3 x 30% (E2)	3 x 45% (E4)
~0.98 m·s <sup>-1</sup>	3 x 10% (E5)	3 x 20% (E7)	3 x 30% (E6)	3 x 45% (E8)
~0.82 m·s <sup>-1</sup>	3 x 10% (E9)	3 x 20% (E11)	3 x 30% (E10)	3 x 45% (E12)
~0.68 m·s <sup>-1</sup>	3 x 10% (E13)	3 x 20% (E15)	3 x 30% (E14)	3 x 45% (E16)

S: Número de series; PV: Pérdida de velocidad; E: Esfuerzo. Los esfuerzos fueron realizados de manera aleatoria para cada participante.

**Tabla 18.** Configuración de los esfuerzos realizados en el **Estudio II** para el ejercicio de **press de banca**.

Intensidad (velocidad asociada)	Volumen: S x PV (%)			
$\sim 0.93 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	3 x 15% (E1)	3 x 25% (E3)	3 x 40% (E2)	3 x 55% (E4)
$\sim 0.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	3 x 15% (E5)	3 x 25% (E7)	3 x 40% (E6)	3 x 55% (E8)
$\sim 0.63 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	3 x 15% (E9)	3 x 25% (E11)	3 x 40% (E10)	3 x 55% (E12)
$\sim 0.47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$	3 x 15% (E13)	3 x 25% (E15)	3 x 40% (E14)	3 x 55% (E16)

S: Número de series; PV: Pérdida de velocidad; E: Esfuerzo. Los esfuerzos fueron realizados de manera aleatoria para cada participante.

Las principales variables dependientes analizadas en el **Estudio II** fueron:

#### Metabólicas:

- **Lactatemia, en  $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ :** Concentración sanguínea de lactato medida después de cada PEF.

#### Mecánicas:

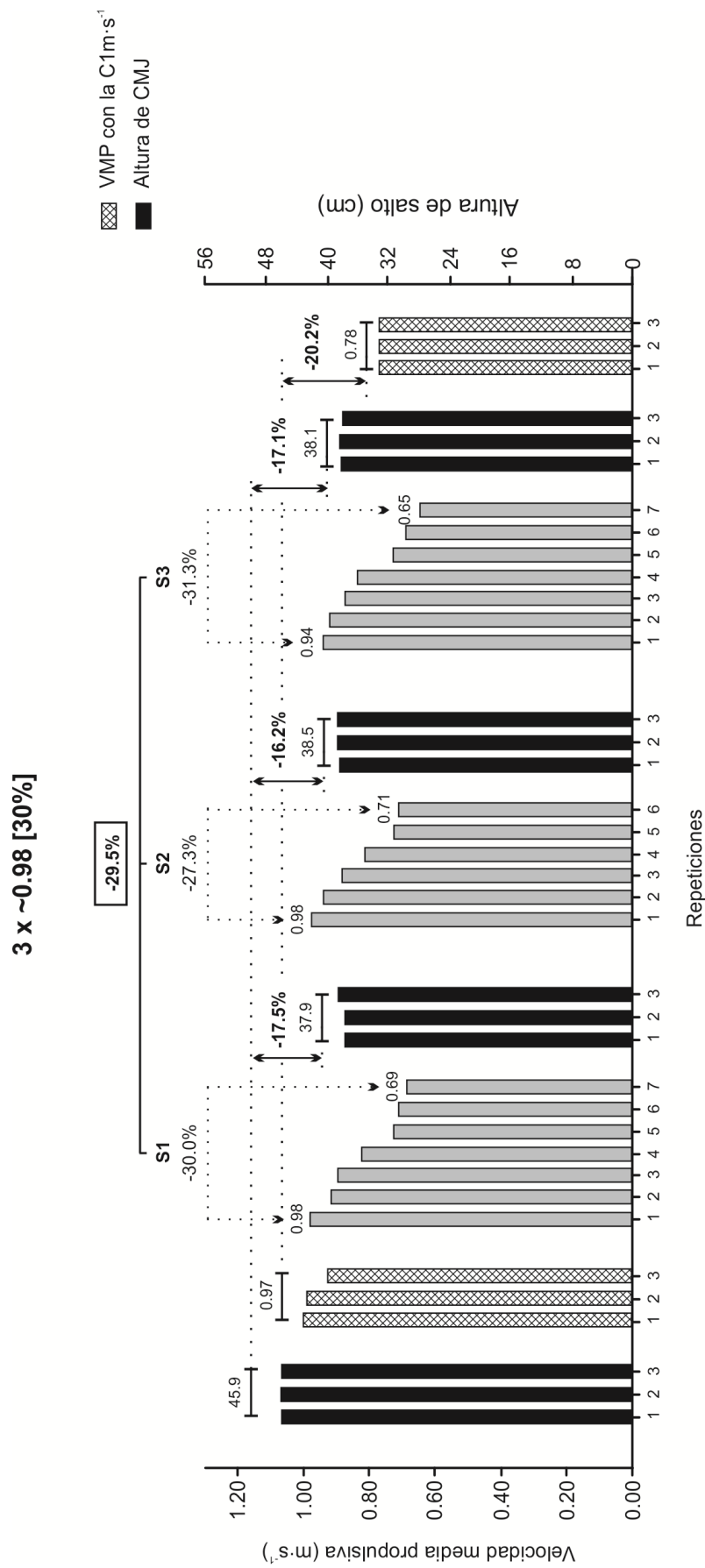
- **IRM estimada ( $IRM_{est}$ ), en kg:** Estimación de la fuerza dinámica máxima en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.
- **Carga, en kg:** Peso absoluto utilizado en cada PEF.
- **Repeticiones realizadas (Rep):** Número de repeticiones realizadas en cada PEF.
- **Índice de esfuerzo (IE):** Producto de la mejor velocidad (normalmente la primera o la segunda repetición) de la primera serie de entrenamiento por el promedio de pérdida de velocidad de las 3 series de entrenamiento (i.e.,  $VMP_{mejor} \times \text{promedio de PV}$ ).
- **Pérdida de altura en el salto vertical (CMJ), en porcentaje:** Porcentaje que representa la media de las pérdidas medias después de cada serie con respecto al valor de altura de salto previo al esfuerzo (o previo a la primera serie). Esta variable solo se calculó para el grupo que realizó los PEFs en el ejercicio de sentadilla completa.
- **Pérdida de VMP con la carga de  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), en porcentaje:** diferencia de VMP entre la media de 3 repeticiones realizadas a máxima velocidad antes e

inmediatamente después de cada PEF [i.e.,  $100 \cdot (\text{promedio de VMP}_{\text{post}} - \text{promedio de VMP}_{\text{pre}}) / \text{promedio de VMP}_{\text{pre}}$ ] con la carga absoluta con la que se consigue una VMP de  $\sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  antes de realizar el ejercicio. Esta carga se mide para cada sesión después del calentamiento, antes de pasar a realizar cada PEF correspondiente, y a los  $\sim 10\text{-}15 \text{ s}$  después de haber terminado el esfuerzo.

- ***Cambios en el tiempo en recorrer 20 m (T20), en porcentajes:*** cambio en el tiempo necesario para recorrer una distancia de 20 m entre un test realizado antes y 3 min después de cada PEF [i.e.,  $100 \cdot (T20_{\text{post}} - T20_{\text{pre}}) / T20_{\text{pre}}$ ]. Esta variable sólo se calculó para el grupo que realizó los PEFs en el ejercicio de sentadilla completa.
- ***Cambios en el tiempo de contacto (TC), en porcentajes:*** cambio entre la media de los 2 tiempos de contacto medidos durante la carrera de 20 m realizada antes y 3 min después de cada PEF [i.e.,  $100 \cdot (\text{promedio TC}_{\text{post}} - \text{promedio TC}_{\text{pre}}) / \text{promedio TC}_{\text{pre}}$ ]. Esta variable sólo se calculó para el grupo que realizó los PEFs en el ejercicio de sentadilla completa.
- ***Cambios en la velocidad alcanzada a los 5 (V5m), 10 (V10m), 15 (V15m) y 20 m (V20m), en porcentajes:*** cambio en la velocidad alcanzada en cada una de las distancias evaluadas (5, 10, 15 y 20 m) durante la carrera de 20 m realizada antes y 3 min después de cada PEF [i.e.,  $100 \cdot (V5_{\text{post}} - V5_{\text{pre}}) / V5_{\text{pre}}$ ]. Esta variable sólo se calculó para el grupo que realizó los PEFs en el ejercicio de sentadilla completa.

En la **Figura 21** se presenta un ejemplo de cómo se determinan las citadas pérdidas de velocidad (dentro de la serie y con la  $\text{C1m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a partir de los valores medios de VMP conseguidos en cada repetición, y de altura de salto a partir de los valores medios de altura conseguidos en cada salto vertical.





**Figura 21.** Ejemplo de determinación de las pérdidas de velocidad (dentro de la serie y con la C1m·s<sup>-1</sup>) y salto vertical tras la realización de un protocolo de entrenamiento de fuerza donde la mejor VMP de la primera serie fue ~0.98 m·s<sup>-1</sup> (60% 1RM) y la pérdida de velocidad en cada serie fue del ~30% [3 x 0.98(30%)] en el ejercicio de **sentadilla completa**.

EMG:

Se calculó el cambio (%) entre la media de los valores obtenidos durante las 3 repeticiones realizadas a máxima velocidad con la  $C1m \cdot s^{-1}$ , antes e inmediatamente después de cada PEF [i.e.,  $100 \cdot (\text{promedio de } Variable_{\text{post}} - \text{promedio de } Variable_{\text{pre}}) / \text{promedio de } Variable_{\text{pre}}$ ] de las siguientes variables:

- **Root mean square (RMS), en mV:** Raíz cuadrada de la media aritmética de los elementos al cuadrado. Es decir, consiste en elevar al cuadrado todas las puntuaciones, obtener después su media aritmética y extraer, finalmente, la raíz cuadrada de dicha media para volver a la unidad de medida original:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad mV$$

- **Integral de la EMG (iEMG), en mV:** El valor del EMG integrado, se expresa como la integral del área por debajo de la señal rectificada:

$$iEMG = \int_{t1}^{t2} |S(t)| dt \quad mV$$

- **Frecuencia Mediana ( $F_{med}$ ), en Hz:** Se calcula a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT) y se define como la frecuencia que divide el espectro en dos partes equivalentes respecto a la potencia:

$$\int_0^{f_{med}} S(f) df = \int_{f_{med}}^{\infty} S(f) df \quad Hz$$

- **Frecuencia Media ( $F_{media}$ ), en Hz:** Se calcula a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT) y se define como es el coeficiente entre los momentos espectrales de orden uno y cero:

$$F_{mean} = \frac{m_1}{m_0} = \frac{\int_0^f f S(f) df}{\int_0^f S(f) df} \quad Hz$$

- **Frecuencia máxima ( $F_{max}$ ), en Hz:** Se calcula a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT) y se define como el valor máximo de potencia alcanzado en el espectro de la señal.
- **Índice de Dimitrov (ID):** es un índice basado en las características espectrales de la EMG en la frecuencia dominante obtenida por el algoritmo de la transformada rápida de Fourier y se calcula como el ratio entre el momento de señal espectral de orden (-1) y el momento espectral de orden 5:

$$F_{Insm5} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} f^{-1} \cdot PS(f) \cdot df}{\int_{f_1}^{f_2} f^5 \cdot PS(f) \cdot df}$$

- **Transformada discreta de Wavelet (TDW):** es un cálculo paramétrico lineal basado en la distribución tiempo-frecuencia de la señal de EMG:

$$TDW = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi\left(\frac{\tau - t}{a}\right) d\tau$$

Todas las variables de EMG analizadas han sido ampliamente utilizadas para estimar el grado de fatiga neuromuscular durante y después de diferentes protocolos de esfuerzo y han sido relacionadas con diferentes procesos fisiológicos relacionados con cambios en

la activación, la velocidad de conducción o la sincronización de las unidades motoras (Bigland-Ritchie, Donovan, & Roussos, 1981; Chowdhury & Nimbarte, 2015; Chowdhury, Nimbarte, Jaridi, & Creese, 2013; Dimitrov, Arabadzhiev, Hogrel, & Dimitrova, 2008; Dimitrov et al., 2006; González-Izal, Malanda, et al., 2010; González-Izal, Rodríguez-Carreno, et al., 2010; Gorostiaga et al., 2012; Hostens, Seghers, Spaepen, & Ramon, 2004; Izquierdo et al., 2009; Masuda, Masuda, Sadoyama, Inaki, & Katsuta, 1999; Penailillo, Silvestre, & Nosaka, 2013). La fiabilidad de estas variables se analizó previamente (**Tabla 19**).

**Tabla 19.** Fiabilidad de las variables de EMG analizadas en el **Estudio II**.

Variable	CCI (IC: 95%)	CV (%)
RMS	0.989 (0.970 - 0.997)	9.7
iEMG	0.985 (0.960 - 0.996)	10.8
F <sub>med</sub>	0.966 (0.932 - 0.986)	7.9
F <sub>media</sub>	0.976 (0.952 - 0.990)	5.8
F <sub>máx</sub>	0.878 (0.756 - 0.950)	19.4
ID	0.986 (0.972 - 0.994)	22.1
TDW2	0.990 (0.973 - 0.997)	9.5
TDW3	0.972 (0.925 - 0.992)	15.5
TDW4	0.966 (0.908 - 0.990)	19.4
TDW5	0.965 (0.906 - 0.990)	20.0
TDW6	0.911 (0.760 - 0.974)	32.3
TDW7	0.921 (0.786 - 0.977)	31.7

CCI: Coeficiente de correlación intraclase; IC: Intervalo de confianza; CV: Coeficiente de variación; RMS: Root mean square; iEMG: Integral de la EMG; F<sub>med</sub>: Frecuencia mediana; F<sub>media</sub>: Frecuencia media; F<sub>máx</sub>: Frecuencia máxima; ID: Índice de Dimitrov; TDW: Transformada discreta de wavelet.

Concretamente, para el cálculo de la variable TDW se utilizó el procedimiento descrito por Peñailillo et al. (2013), el cual vamos a redactar literalmente. Se usó la wavelet madre Daubechies (db4) para calcular los coeficientes de la wavelet en los 8 dominios (**Tabla 20**). Sin embargo, dado que la mayoría del espectro de frecuencia de la EMG está en el rango entre 10 - 250 Hz (Wakeling, Pascual, Nigg, & von Tscharnier, 2001), en este estudio solo nos centramos en analizar los 6 dominios centrales (dominios del 2 al 7). Para cada dominio se obtuvo la intensidad media de los valores absolutos de los coeficientes de la wavelet para el intervalo de 500 ms de EMG analizado, y se calculó el porcentaje de cambio en la intensidad de cada dominio desde el pre-test al post-test.

**Tabla 20.** Dominios de la transformada discreta de wavelet y sus rangos de frecuencias.

Dominio Wavelet	Rango de Frecuencia (Hz)	
	Frecuencia más baja	Frecuencia más alta
1	250	500
2	125	250
3	62.5	125
4	31.2	62.5
5	15.6	31.2
6	7.8	15.6
7	3.9	7.8
8	1.9	3.9

### E. Control de Variables Extrañas

Este apartado ya ha sido descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.E).

### F. Evaluaciones y Pruebas Físicas

#### *Análisis antropométrico*

- **Masa corporal** (kg): descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F).
- **Talla** (m): descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F).

#### *Pruebas físicas*

- **Test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de press de banca:** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F).
- **Test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de sentadilla completa:** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio I.3** (Apartado 4.6.1.F), pero en este caso no se midió la 1RM directamente.

La carga inicial del test para todos los participantes se estableció en 30 kg y fue incrementando progresivamente de 10 en 10 kg hasta que la VMP obtenida durante la fase concéntrica fue inferior a  $0.60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , la cual se corresponde con el ~85% 1RM en este ejercicio (Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2017). Durante el test, se realizaron 3 repeticiones con cargas bajas ( $\text{VMP} > 1.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), dos con cargas medias ( $1.10 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} > \text{MPV} > 0.80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), y solo una con cargas altas ( $\text{MPV} < 0.80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). El tiempo de recuperación entre series osciló entre 3 (cargas bajas) y 4 min (cargas altas). La  $1\text{RM}_{\text{est}}$  fue calculada para cada participante a partir de la VMP obtenida con la carga más alta levantada durante el test de cargas progresivas como sigue:  $(100 \cdot \text{carga}) / (-2.185 \cdot \text{VMP}^2) - (61.53 \cdot \text{VMP}) + 122.5$  (Sánchez-Medina, et al., 2017).

- **Protocolos de entrenamiento de fuerza (PEF):** Cada participante realizó 16 PEFs definidos por la velocidad de la primera repetición de la primera serie y la pérdida de velocidad dentro de cada serie de entrenamiento. De este modo, la intensidad relativa para cada participante en cada sesión de test se determinó a partir de la relación porcentaje de 1RM-velocidad en los ejercicios de press de banca y sentadilla, ya que se ha encontrado que existe una estrecha relación entre el porcentaje de 1RM y VMP para estos ejercicios (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, García-Pallarés, Pérez, Fernandes, & González Badillo, 2011; Sánchez-Medina, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2017). Así, se usó una determinada VMP objetivo en cada sesión como estimación del porcentaje de 1RM. Esta velocidad tenía que ser alcanzada durante la primera o segunda repetición del test de MNR. Dichas velocidades objetivo fueron las siguientes: 1)  $\sim 0.93 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (50% 1RM),  $\sim 0.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (60% 1RM),  $\sim 0.62 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (70% 1RM), y  $\sim 0.47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (80% 1RM) para el ejercicio de press de banca (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010); 2)  $\sim 1.13 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (50% 1RM),  $\sim 0.98 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (60% 1RM),  $\sim 0.82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (70% 1RM), y  $\sim 0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (80% 1RM) para el ejercicio de sentadilla completa (Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2011; Sánchez-Medina, et al., 2017). Para poder ajustar la velocidad de ejecución a la velocidad asociada ( $\pm 0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) con cada % 1RM objetivo de cada sesión, la carga absoluta (kg) se ajustó individualmente para cada participante antes de cada PEF. El volumen (número de repeticiones) en cada serie no se programó previamente a la realización del los PEF, sino que venía determinado individualmente una vez

alcanzada la pérdida de VMP prevista con respecto a la mejor velocidad de la serie. De este modo, cada serie de entrenamiento finalizó cuando se alcanzó una pérdida de velocidad próxima a la programada para cada sesión. Las pérdidas establecidas fueron: 15, 25, 40 y 55% para el ejercicio de press de banca, y 10, 20, 30 y 45% para el ejercicio de sentadilla completa. Los motivos por los cuales se seleccionaron estas intensidades y pérdidas de velocidad en la serie han sido expuestos anteriormente en el apartado **D. Variables objeto de estudio**. Los porcentajes de pérdida de VMP dentro de la serie fueron superiores en el ejercicio de press de banca para que los porcentajes de repeticiones realizados con respecto a las que pueden completar fueran similares para ambos ejercicios (ver **Estudio I.3**). Para analizar la respuesta mecánica, metabólica y neuromuscular aguda ante cada PEF, los participantes llevaron a cabo una batería de medidas antes e inmediatamente después de cada esfuerzo: Concentración sanguínea de lactato, test de velocidad en 20 m (sólo en el grupo que realizó el ejercicio de sentadilla completa), CMJ (sólo en el grupo que realizó el ejercicio de sentadilla completa), test con la carga con la que se alcanza una VMP de  $\sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  ( $\text{C1 m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) y EMG de superficie (sólo en el grupo que realizó el ejercicio de sentadilla completa). Durante cada PEF, se les pidió a los participantes que ejecutaran todas las repeticiones de todos los ejercicios a la máxima velocidad posible. Más abajo, en el apartado **5.4.H Plan de trabajo**, se describe de manera detallada el protocolo seguido en cada uno de los PEFs.

- **Concentración sanguínea de lactato (LAC), en  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ :** Para la determinación de la concentración sanguínea de lactato se obtuvo una muestra de sangre capilar del lóbulo de la oreja antes y después (1 min 30 s en el ejercicio de press de banca y 2 min en el ejercicio de sentadilla completa) de cada PEF (**Figura 22**).

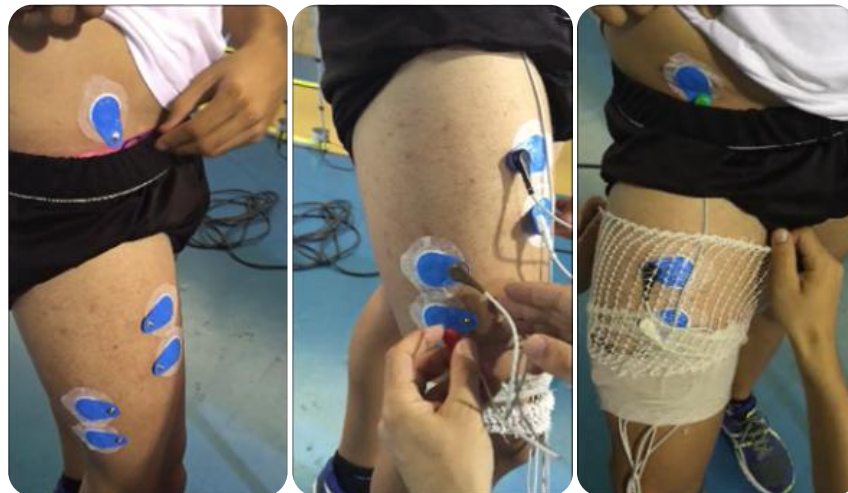


**Figura 22.** Toma de muestra de sangre para la medición de la concentración de lactato.

- **Test con la carga con la que se alcanza una VMP de  $\sim 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $C1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ):** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio I.2** y **Estudio I.3** (Apartados 4.5.1.F y 4.6.1.F). Durante los PEF realizados en el ejercicio de sentadilla completa, antes de la realización del test se procedió a la colocación de los electrodos para el registro y adquisición de la actividad eléctrica muscular. Los registros de EMG se realizaron mediante electrodos de superficie (Ag-AgCl), desechables, adhesivos, de 10 mm de diámetro (marca: Ambu; modelo: Blue sensor L) y con un gel conductor para asegurar el paso de corriente de la piel al electrodo. Los electrodos se colocaron siempre sobre el muslo derecho de los participantes. La ubicación de los electrodos se determinó mediante la palpación de los músculos a estudiar en estado de tensión (contracción), que en nuestro caso fueron el recto femoral (RF) y vasto lateral (VL). La localización correcta del electrodo de superficie es la zona intermedia entre la zona de inervación de los músculos y el tendón muscular como figura en las Recomendaciones Europeas para la Electromiografía de Superficie (SENIAM) (Hermens, Freriks, Disselhorst-Klug, & Rau, 2000; Stegeman, Blok, Hermens, & Roeleveld, 2000), ya que cuando el electrodo se ubica en una zona demasiado próxima al tendón, la señal registrada es de muy baja amplitud y si se sitúan sobre la unión neuromuscular, la señal se contamina con procesos sinápticos (**Figura 23**). La determinación de la ubicación de los electrodos se realizó solamente durante el primer PEF. Para asegurar que los electrodos se colocaron siempre en el mismo lugar, se realizó una marcación de los electrodos sobre la piel de los participantes con un marcador de piel indeleble



(Edding 8020, Madrid, España). Para mejorar la adquisición de la señal, se preparó previamente la piel de los participantes afeitando y limpiando con alcohol la zona de registro. Esta técnica fue designada para reducir la impedancia de la piel a un valor menor a 5 k ohm ( $\Omega$ ) a fin de obtener una señal eléctrica de calidad. Si la impedancia medida era superior a 5 k  $\Omega$ , se quitaron los electrodos y se realizaron nuevamente los procedimientos de preparación. Además, para mejorar los registros de EMG, se sostuvieron los cables con una malla elástica para evitar el desplazamiento y su posible interferencia sobre la señal de EMG (**Figura 23**). El mismo investigador identificó los puntos anatómicos y colocó los electrodos en todas las sesiones y para todos los participantes. Se colocaron dos parejas de electrodos en la superficie cutánea para cada músculo indicado (RF y VL). La separación entre electrodos fue de 20 mm. Un quinto electrodo de referencia monopolar se colocó sobre una zona no musculada (cresta ilíaca anterosuperior). Una vez colocados los electrodos se procedió a la realización del test.



**Figura 23.** Representación gráfica de la colocación de los electrodos para el registro de la señal de EMG durante el ejercicio de **sentadilla completa**.

- **Test de salto con contramovimiento (CMJ):** El CMJ o ‘counter movement jump’ es un salto vertical en el que se busca alcanzar la máxima elevación del centro de gravedad realizando una flexión-extensión rápida de piernas con la mínima parada entre ambas fases. En este tipo de salto no existe la ayuda de brazos, por lo que se instruyó a los participantes para que mantuvieran las manos en las caderas durante

todo el recorrido. Los participantes eligieron libremente el ángulo de flexión de piernas, aunque se recomendó que llegaran aproximadamente hasta un ángulo aproximado de 90°. Para una correcta ejecución, se les pidió a los participantes que durante la fase de vuelo mantuvieran el tronco recto y las piernas rectas con las rodillas y los pies extendidos, tomando contacto con el suelo con las puntas de los pies. Después de tomar contacto con el suelo, los participantes podían flexionar las rodillas para amortiguar el impacto de la caída (**Figura 24**). Por último, para asegurarnos de que el desplazamiento durante el salto era totalmente vertical, se colocaron unas líneas verticales separadas por 0.5 m y se les pidió a los participantes que despegaran y cayeran dentro de dicha área. Si los participantes caían fuera del área designada, el salto no fue considerado. En cada PEF, se realizaron tres saltos antes e inmediatamente después de cada serie con un tiempo de recuperación de 5 s entre cada uno de ellos. Se calculó la media de los 3 saltos realizados antes del esfuerzo y se estableció como valor inicial. Este valor fue comparado con la media de los 3 saltos obtenidos después de cada serie de entrenamiento para calcular el porcentaje de pérdida. El test de CMJ mostró una alta fiabilidad en todas las sesiones [CV: 1.53%; CCI: 0.991 (0.989 - 0.993)].



**Figura 24.** Ejecución del test de salto con contramovimiento (CMJ) mostrando la posición de inicio, la posición de máxima flexión de piernas y la posición del cuerpo durante la fase de vuelo.

- **Test de velocidad en 20 m:** Se midió el tiempo en recorrer 10 y 20 metros utilizando unas células fotoeléctricas (Microgate, Bolzano, Italia). Para esto fue necesario colocar 3 marcadores a 0 m, 10 m y 20 m a una altura aproximada de 1.20 m. Las mediciones se realizaron en un recinto cerrado, en una recta de 40 m acondicionada para este tipo de pruebas, con suelo de tartán. Todos los participantes realizaron un calentamiento estandarizado previo de 15 min que consistió en 5 min de carrera continua suave, 4 progresiones (2 min de recuperación entre cada una de ellas) de 30-35 m a intensidad creciente y 2 repetición de 10 m a la máxima velocidad posible. Después del calentamiento, los sujetos pasaban a realizar el test de 20 m, con la medición del tiempo parcial al pasar por 10 m. Antes de cada PEF se realizaron dos intentos con un descanso de 3 min entre cada uno de ellos. Los participantes partían de una posición de pie con una pierna adelantada y colocada ésta inmediatamente por detrás de la línea de salida que estaba situada 1 m por detrás de la marca de 0 m. Una vez iniciada la carrera, los participantes debían recorrer los 20 m establecidos en el menor tiempo posible (**Figura 25**). El mejor de los dos intentos se utilizó como valor inicial pre-esfuerzo. Dos minutos después de realizar las 3 repeticiones a la máxima velocidad posible con la  $C1m \cdot s^{-1}$  tras la última serie de entrenamiento, los participantes volvieron a realizar el test de carrera en 20 m. Además de medir el tiempo en recorrer 10 y 20 m, durante la carrera se evaluó también la velocidad instantánea de desplazamiento utilizando un radar, y el tiempo de contacto del pie durante el apoyo utilizando plataformas de infrarrojo.



**Figura 25.** Ejecución del test de velocidad en 20 m mostrando la posición de partida (1 m por detrás de la distancia 0 m) y fase de aceleración.

## G. Instrumental de Evaluación

### *Máquina tipo Smith*

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.G).

### *Transductor lineal de velocidad*

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio I.1**. (Apartado 4.4.1.G).

### *Plataforma dinamométrica*

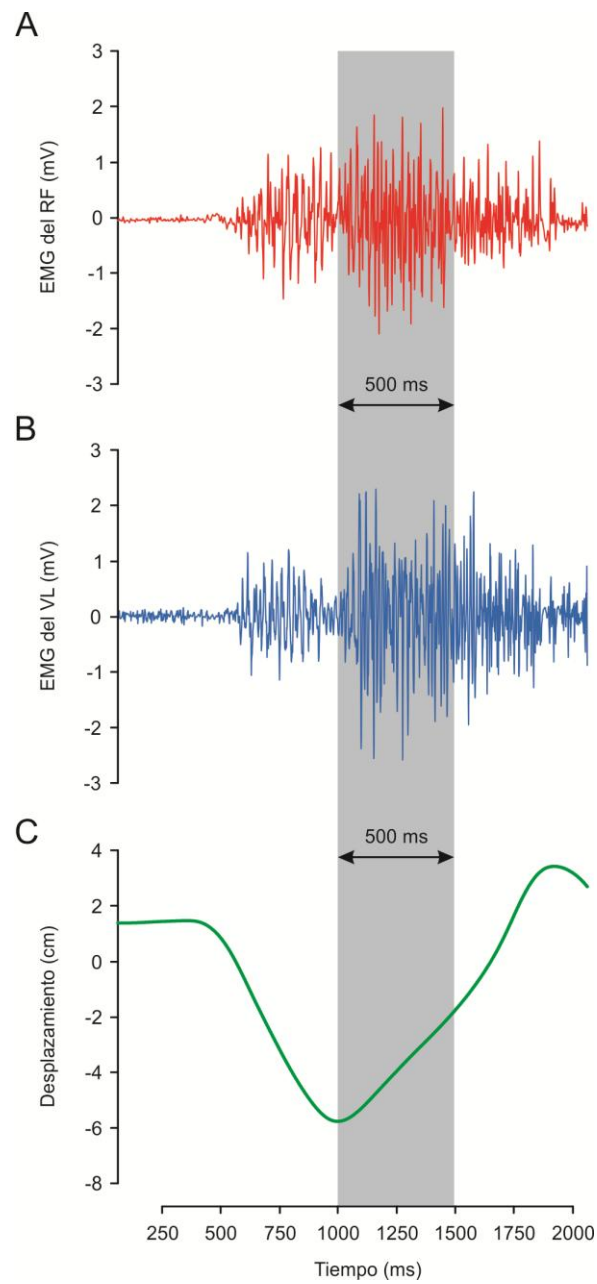
Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio I.2**. (Apartado 4.5.1.G).

### *Electromiógrafo*

El estudio electromiográfico (EMG) se realizó con un sistema de adquisición de señales biológicas PowerLab, modelo ML865-4-25T de 6 canales analógicos de entrada (**Figura 26**), el cual estaba sincronizado con la plataforma dinamométrica. Las señales biológicas suelen ser de magnitudes pequeñas, contienen ruido innecesario y pueden estar enmascaradas por otras señales de diferentes fenómenos biológicos, por lo que todas las señales fueron amplificadas, filtradas con un paso de banda entre 10 y 450 Hz para EMG, con una razón de rechazo al modo común de 80 dB y digitalizadas con una frecuencia de muestreo de 1 KHz (por encima de la frecuencia de Nyquist), usando un conversor analógico/digital de 16 Bits. Las señales de EMG fueron adquiridas a través del Software informático LabChart versión 7.0 (National Instruments Corporation, Austin, TX, USA) y posteriormente analizadas usando el Software informático Matlab 2011a (The MathWorks Inc., Natick, Massachusetts, USA). Para analizar los cambios en la actividad eléctrica muscular se tomaron los primeros 500 ms de la fase concéntrica (**Figura 27**).



**Figura 26.** Electromiógrafo utilizado para los registros de EMG.

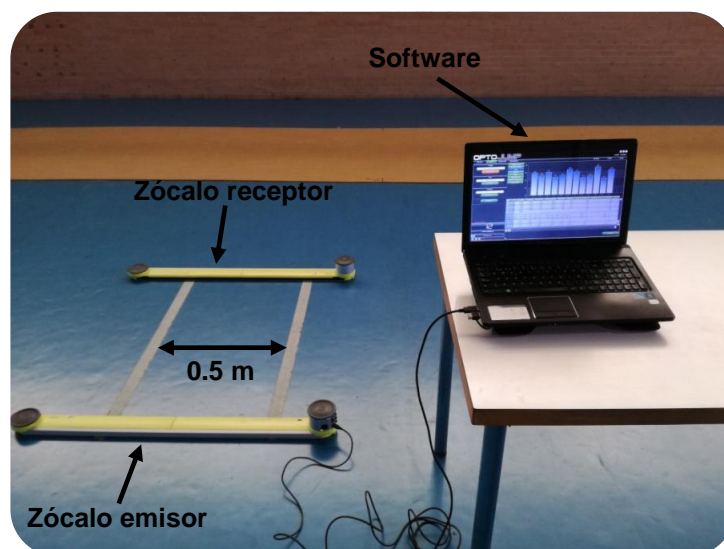


**Figura 27.** Ejemplo de señal de EMG de los músculos RF (A) y VL (B) sincronizado con la señal de desplazamiento durante una repetición (C) para mostrar el intervalo de EMG analizado.

### Plataforma de salto

La capacidad de salto se determinó utilizando un zócalo o plataforma de contactos *Optojump* (Microgate, Bolzano, Italia). Este es un sistema de obtención óptica de datos, compuesto de una barra óptica transmisora y una receptora (**Figura 28**). Cada barra tiene una longitud de 1 m y contiene 96 leds infrarrojos (1.0416 cm resolución). Los leds ubicados sobre la barra transmisora (RX) se comunican continuamente con los leds ubicados en la barra receptora (TX). El sistema detecta eventuales interrupciones y su duración. Esto permite la medición de los tiempos de vuelo y de contacto durante la ejecución de una serie de saltos, con una precisión de 1/1000 de segundo. Partiendo de estos datos, el software particularmente diseñado, permite la obtención, con la máxima precisión y en tiempo real, de una serie de parámetros ligados al rendimiento del atleta.

En el caso del salto vertical, la plataforma de contactos *Optojump* cuenta con un sistema de cronometraje electrónico (microprocesador) que se acciona automáticamente en el momento que el participante que está siendo evaluado despega los pies del suelo y lo cierra en el momento en el que los pies del participante tocan de nuevo el suelo. Por tanto, la información que nos aporta el dispositivo es el tiempo de vuelo ( $t$ ) (subida + bajada), y también la altura ( $h$ ) del salto calculada a través de la fórmula:  $h = t^2 \cdot g / 8$ , donde  $g$  es la aceleración de la gravedad. La fiabilidad del sistema *Optojump* para calcular el tiempo de vuelo y la estimación de la altura de salto ha sido analizada recientemente mostrando una alta reproducibilidad (Glatthorn et al., 2011).



**Figura 28.** Sistema *Optojump Next* utilizado para la medición del salto vertical (CMJ).



### **Células fotoeléctricas**

El tiempo en recorrer 10 (T10) y 20 m (T20) se midió con las células fotoeléctricas Witty (Wireless training timer, Microgate, Bolzano, Italia). Estas células fotoeléctricas constan de un transmisor de rayos de luz y un detector. Un haz de luz se establece entre el emisor y un espejo catadióptrico. Cuando se enciende el transmisor, el rayo infrarrojo debe reflejarse en el catadióptrico y volver al receptor. Una señal acústica nos indica que ambos elementos están colocados correctamente, uno enfrente del otro. Cuando el deportista atraviesa el haz de luz, situado perpendicularmente a la dirección del movimiento, ésta deja de recibirse en el receptor (**Figura 29**). Como consecuencia, se interrumpe la corriente y este suceso es detectado electrónicamente determinándose con gran exactitud el momento de la interrupción. Los tiempos registrados se transmiten vía radio a una unidad central con una precisión de una centésima de segundo (0.01 s) (frecuencia de muestreo de 100Hz). El CCI (95% IC) fue de 0.924 (0.874 - 0.956) para T10 y 0.964 (0.941 - 0.979) para T20, mientras que el CV fue de 2.0% y 1.1%, para T10 y T20, respectivamente.



**Figura 29.** Sistema *Witty* utilizado para la medición de los tiempos en carrera.

### **Medidor de tiempos de contacto**

Los tiempos de contacto se determinaron utilizando un zócalo o plataforma de contactos *Optojump* (Microgate, Bolzano, Italia). Las características de este sistema se han descrito en el punto anterior (*Plataforma de salto*). Para la medición del tiempo de contacto durante la carrera se instalaron 5 pares de zócalos sincronizados entre sí a

través del *sistema modular*, los cuales fueron colocados sobre los bordes laterales de la pista de tartán desde los 10 a los 15 m (**Figura 30**). Este dispositivo nos permitió registrar el tiempo de contacto de dos pisadas consecutivas y la distancia entre esas dos pisadas. El CCI (95% IC) para el tiempo de contacto y la longitud del paso fue de 0.98 (0.96 - 0.99) y 0.97 (0.95 - 0.98), respectivamente, mientras que el CV fue de 2.9% y 2.0%, para el tiempo de contacto y la longitud del paso, respectivamente.



**Figura 30.** Sistema *Optojump Next* utilizado para la medición de los tiempos de contacto durante la carrera de 20 m.

### ***Analizador de lactato***

Para la medición de la concentración sanguínea de lactato se utilizó el medidor de lactato portátil Lactate Pro 2 LT-1730 (Arkray, Kyoto, Japan) (**Figura 31**). El sistema se calibra automáticamente al introducir la tira reactiva y necesita solo 0.3  $\mu\text{l}$  de volumen de sangre para hacer la medición de la concentración de lactato. El rango de medida oscila entre 0.5 - 25.0  $\text{mmol/L}^{-1}$  y tiene memoria para almacenar 330 resultados. Este sistema es fácil de utilizar y ha mostrado una alta fiabilidad para un rango fisiológico de 0.5 - 25.0  $\text{mmol/L}^{-1}$  (Pyne, Boston, Martin, & Logan, 2000).





**Figura 31.** Medidor de lactato portátil Lactate Pro 2 LT-1730.

### **Radar**

La velocidad de carrera se midió de forma instantánea con un radar modelo Stalker ATS II (*Acceleration Testing System*). Este aparato detecta los cambios en la velocidad del objeto apuntado (en este caso la persona que realiza una carrera) gracias a un rayo que emite y que choca contra el objeto (**Figura 32**). Los datos de aceleración y velocidad se transmiten al ordenador donde se puede observar y analizar las gráfica del comportamiento de la velocidad del sujeto con una frecuencia de 0.01 s y una precisión de  $\pm 0.1 \text{ Km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Los datos de CCI y CV para las variables analizadas en este estudio aparecen en la **Tabla 21**.



**Figura 32.** Radar Stalker ATS II.

**Tabla 21.** Fiabilidad de la velocidad alcanzada a los 5, 10, 15 y 20 m durante el test de carrera en 20 m.

Variable	CCI (95% IC)	CV (%)
V5 m	0.865 (0.775 - 0.924)	2.3
V10 m	0.874 (0.789 - 0.928)	2.0
V15 m	0.939 (0.897 - 0.965)	1.5
V20 m	0.954 (0.923 - 0.974)	1.5

CCI: Coeficiente de correlación intraclase; IC: Intervalo de confianza; CV: Coeficiente de variación; V5, 10, 15 y 20 m: Velocidad alcanzada a los 5, 10, 15 y 20 m durante el test de carrera en 20 m.

## H. Plan de trabajo

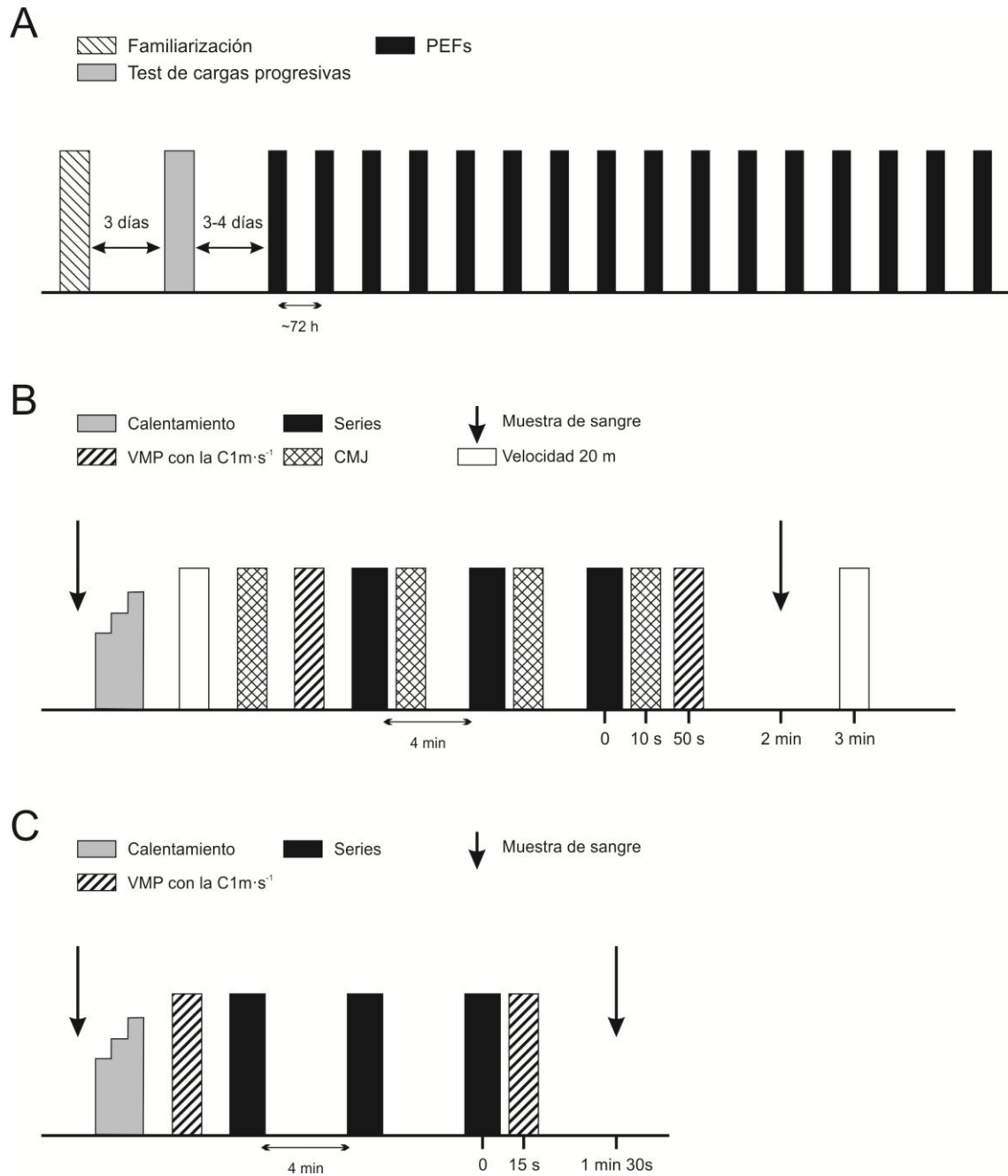
El presente estudio tuvo una duración total de 10 semanas. Durante ese tiempo, cada participante realizó un total de 17 sesiones de evaluación (un test de cargas progresivas y 16 PEFs en press de banca o sentadilla completa) separadas por 72 h. Los esfuerzos fueron realizados lunes y jueves o martes y viernes (**Figura 33A**). Se establecieron 6 turnos (10:00 h, 11:30 h, 13:00 h, 16:00 h, 17:30 h, y 19:00 h) durante cada día para que los participantes pudieran elegir la hora a la que realizar los esfuerzos. Después de la primera sesión de evaluación, se prestó especial atención a que los participantes realizaran todos los tests de MNR a la misma hora ( $\pm 1$ h) para intentar eliminar posibles variables contaminantes. Los PEFs fueron distribuidos de manera aleatoria para cada participante. Para poder controlar adecuadamente las sesiones de evaluación, el número máximo de participantes en cada turno fue de 2. Cada sesión tuvo una duración aproximada de 1 h y 20 min.

En cada una de los 16 PEFs, el orden de trabajo para cada participante para el ejercicio de sentadilla fue el siguiente (**Figura 33B**):

1. Determinación de lactato en situación de reposo, tras 5 min de descanso en posición de sentado.
2. Calentamiento
3. Test de velocidad en 20 m.
4. Test de altura de salto en CMJ.
5. Colocación de los electrodos para el registro de la EMG de los músculos RF y VL.

6. Determinación de la carga absoluta (kg) con la que se consigue una VMP de  $\sim 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Se realizó inmediatamente después del calentamiento. Para ello, cada sujeto ejecutó 3 repeticiones a la máxima velocidad posible con la  $C1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ .
7. Realización del PEF con la intensidad y el porcentaje de pérdida de velocidad dentro de la serie programado para cada día. Se realizaron siempre 3 series separadas por 4 min de recuperación entre ellas. La velocidad de ejecución en cada repetición fue siempre la máxima posible.
8. Inmediatamente después de cada serie de entrenamiento se realizaron 3 CMJs para la determinación del porcentaje de pérdida de altura de salto.
9. Inmediatamente después de haber concluido la última serie, los sujetos realizaron 3 CMJ máximos y a continuación 3 repeticiones con la misma carga absoluta que la empleada en el punto 6. Para ello, dos evaluadores cambiaron rápidamente las pesas.
10. Un minuto después de haber terminado las 3 repeticiones con la  $C1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  se tomó una pequeña muestra de sangre para la determinación de la concentración de lactato.
11. Dos minutos después de haber terminado las 3 repeticiones con la  $C1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , los participantes realizaron nuevamente una carrera de 20 m a la máxima intensidad posible.

El protocolo seguido para el grupo que realizaba los PEF en el ejercicio de press de banca fue el mismo, eliminando aquellos ejercicios (test de velocidad en 20 m y test de salto vertical) que no fueron realizados para este tipo de PEFs (**Figura 33C**).



**Figura 33.** Representación esquemática del diseño del **Estudio II (A)** con la descripción del protocolo seguido durante las sesiones realizadas para el ejercicio de sentadilla completa (**B**) y press de banca (**C**).

## I. Análisis estadístico

La media y la desviación típica (DT) se calculó a través de métodos estadísticos estandarizados. La fiabilidad relativa fue analizada a través del coeficiente de correlación intraclass (CCI), el cual se calculó utilizando el modelo de un factor con efectos aleatorios y un intervalo de confianza del 95%. Este modelo es el más exigente,

ya que tiene en consideración las diferencias entre las medias de las puntuaciones. La fiabilidad absoluta se calculó usando el error estándar de medida ( $SEM = \sqrt{\text{Media Cuadrática de Error}}$ ). Los valores de SEM fueron expresados como porcentaje de sus respectivas medias a través del CV (Atkinson & Nevill, 1998). Para comprobar la normalidad de la distribución en cada una de las variables se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk. Se usó una prueba ANOVA de medidas repetidas para comprobar la existencia de diferencias entre las pérdidas mecánicas, la concentración de lactato y los cambios en las variables de EMG producidas tras los 16 REPs. Se aplicó el correspondiente test de corrección de *Bonferroni* para detectar las diferencias entre las medias con múltiples medidas. Las diferencias en la pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  y la concentración de lactato en sangre entre ejercicios (sentadilla completa y press de banca) se analizaron mediante una prueba *t* de *Student* para muestras independientes. Las correlaciones entre los cambios en las variables mecánicas, de EMG y la concentración de lactato se estudiaron mediante el coeficiente de correlación de *Pearson*. El nivel de significación estadístico se fijó en el 5% ( $P \leq 0.05$ ). Todos los análisis fueron realizados utilizando el paquete de software estadístico SPSS versión 17.0 (SPSS, Chicago, IL).



## 5.2. Resultados

En las **Tablas 22 y 23** aparece un resumen con las características de los esfuerzos realizados en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente. En ellas se puede observar que tanto la mejor VMP de la primera serie de entrenamiento como el promedio de pérdida de VMP de las tres series realizadas en cada PEF se ajustaron a lo *programado*. También se puede observar cómo, como era de esperar, para una misma pérdida de velocidad en la serie, el número de repeticiones realizado fue mayor cuanto menor fue la intensidad relativa utilizada.

### 5.2.1. Pérdida de VMP con la $C_{1m \cdot s^{-1}}$ y concentración sanguínea de lactato

Tanto en los PEFs realizados en el ejercicio de sentadilla completa como press de banca, las pérdidas de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  y las concentraciones de lactato post-esfuerzo fueron progresivamente mayores a medida que aumentó el porcentaje de pérdida de velocidad dentro de la serie con cada una de las intensidades utilizadas (Sentadilla completa: **Figuras 34A y 34B**; Press de banca: **Figuras 34D y 34E**). Ante la misma pérdida de VMP en la serie, la pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  y la concentración sanguínea de lactato post-esfuerzo fueron mayores cuanto mayor era la VMP de la primera repetición de la primera serie (i.e., cuanto menor era intensidad relativa) (**Figura 34; Tabla 23**). Al comparar los cambios en ambas variables entre los ejercicios de sentadilla completa y press de banca se observó que las pérdidas de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  fueron mayores en el ejercicio de press de banca, aunque solo hubo diferencias estadísticamente significativas en aquellos PEFs donde las pérdidas de VMP dentro de la serie fueron superiores al 30% en el ejercicio de sentadilla completa y al 40% en el ejercicio de press de banca (**Tabla 24**). La lactatemia post-esfuerzo fue siempre mayor en los PEFs realizados en el ejercicio de sentadilla completa, aunque las diferencias fueron estadísticamente significativas principalmente en los esfuerzos realizados con las intensidades del 50% y el 60% 1RM (PEFs 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 10; **Tabla 24**).

Tabla 22. Características descriptivas de los protocolos de entrenamiento de fuerza realizados en cada sesión para el ejercicio de **sentadilla completa**.

<i>Programado</i>	PEF 1	PEF 2	PEF 3	PEF 4	PEF 5	PEF 6	PEF 7	PEF 8
<b>Series x PV (%)</b>	3 x 10%	3 x 20%	3 x 30%	3 x 45%	3 x 10%	3 x 20%	3 x 30%	3 x 45%
<b>VMP objetivo (<math>\text{m}\cdot\text{s}^{-1}</math>)</b>	~1.13 (50% 1RM)	~1.13 (50% 1RM)	~1.13 (50% 1RM)	~1.13 (50% 1RM)	~0.98 (60% 1RM)	~0.98 (60% 1RM)	0.98 (60% 1RM)	0.98 (60% 1RM)
<i>Realizado</i>								
<b>PV (%)</b>	9.9 ± 1.0	20.0 ± 0.9	30.8 ± 2.2	46.9 ± 2.5	11.5 ± 1.6	20.2 ± 1.7	29.7 ± 1.7	47.4 ± 2.4
<b>VMP promedio (<math>\text{m}\cdot\text{s}^{-1}</math>)</b>	1.13 ± 0.03 (~50.0% 1RM)	1.14 ± 0.02 (~49.2% 1RM)	1.13 ± 0.02 (~50.5% 1RM)	1.12 ± 0.02 (~50.6% 1RM)	0.99 ± 0.03 (~59.5% 1RM)	0.99 ± 0.03 (~59.5% 1RM)	1.00 ± 0.03 (~59.1% 1RM)	0.99 ± 0.03 (~59.6% 1RM)
<b>Promedio de Rep</b>	5.0 ± 1.4	8.2 ± 2.2	10.5 ± 2.9	13.4 ± 3.7	3.8 ± 1.0	5.3 ± 1.6	6.9 ± 1.7	9.2 ± 2.2
<i>Programado</i>	PEF 9	PEF 10	PEF 11	PEF 12	PEF 13	PEF 14	PEF 15	PEF 16
<b>Series x PV (%)</b>	3 x 10%	3 x 20%	3 x 30%	3 x 45%	3 x 10%	3 x 20%	3 x 30%	3 x 45%
<b>VMP objetivo (<math>\text{m}\cdot\text{s}^{-1}</math>)</b>	~0.82 (70% 1RM)	~0.82 (70% 1RM)	~0.82 (70% 1RM)	~0.82 (70% 1RM)	~0.68 (80% 1RM)	~0.68 (80% 1RM)	~0.68 (80% 1RM)	~0.68 (80% 1RM)
<i>Realizado</i>								
<b>PV (%)</b>	10.7 ± 2.3	19.8 ± 2.0	29.9 ± 2.0	45.8 ± 2.9	11.0 ± 1.2	21.1 ± 2.5	30.9 ± 2.3	48.1 ± 4.5
<b>VMP promedio (<math>\text{m}\cdot\text{s}^{-1}</math>)</b>	0.84 ± 0.03 (~69.3% 1RM)	0.85 ± 0.03 (~68.9% 1RM)	0.83 ± 0.01 (~69.7% 1RM)	0.84 ± 0.02 (~69.2% 1RM)	0.71 ± 0.02 (~77.5% 1RM)	0.70 ± 0.02 (~78.2% 1RM)	0.71 ± 0.02 (~77.7% 1RM)	0.70 ± 0.03 (~78.5% 1RM)
<b>Promedio de Rep</b>	2.5 ± 0.6	3.5 ± 1.0	4.4 ± 1.0	5.8 ± 1.1	1.9 ± 0.2	2.5 ± 0.7	3.2 ± 0.6	3.8 ± 0.9
PEF: Protocolo de entrenamiento de fuerza; VMP: Velocidad media propulsiva; PV: Pérdida de velocidad; Rep: Repeticiones; 1RM: Una repetición máxima								



Tabla 23. Características descriptivas de los protocolos de entrenamiento de fuerza realizados en cada sesión para el ejercicio de **press de banca**.

<i>Programado</i>	PEF 1	PEF 2	PEF 3	PEF 4	PEF 5	PEF 6	PEF 7	PEF 8
<b>Series x PV (%)</b>	3 x 15%	3 x 25%	3 x 40%	3 x 55%	3 x 15%	3 x 25%	3 x 40%	3 x 55%
<b>VMP objetivo (m·s<sup>-1</sup>)</b>	~0.93 (50% 1RM)	~0.93 (50% 1RM)	~0.93 (50% 1RM)	~0.93 (50% 1RM)	~0.79 (60% 1RM)	~0.79 (60% 1RM)	~0.79 (60% 1RM)	~0.79 (60% 1RM)
<i>Realizado</i>								
<b>PV (%)</b>	15.1 ± 1.3	25.3 ± 0.9	40.2 ± 1.5	54.9 ± 1.6	15.3 ± 0.9	25.3 ± 1.3	40.9 ± 1.3	55.1 ± 1.9
<b>VMP promedio (m·s<sup>-1</sup>)</b>	0.92 ± 0.03 (~51.7% 1RM)	0.93 ± 0.03 (~51.5% 1RM)	0.93 ± 0.02 (~51.5% 1RM)	0.93 ± 0.02 (~51.5% 1RM)	0.80 ± 0.02 (~58.9% 1RM)	0.80 ± 0.02 (~58.7% 1RM)	0.80 ± 0.02 (~58.6% 1RM)	0.79 ± 0.02 (~59.3% 1RM)
<b>Promedio de Rep</b>	4.8 ± 1.0	7.7 ± 1.4	10.9 ± 1.8	13.2 ± 2.1	4.2 ± 0.6	5.6 ± 0.8	8.1 ± 1.6	9.6 ± 1.4
<i>Programado</i>	PEF 9	PEF 10	PEF 11	PEF 12	PEF 13	PEF 14	PEF 15	PEF 16
<b>Series x PV (%)</b>	3 x 15%	3 x 25%	3 x 40%	3 x 55%	3 x 15%	3 x 25%	3 x 40%	3 x 55%
<b>VMP objetivo (m·s<sup>-1</sup>)</b>	~0.63 (70% 1RM)	~0.63 (70% 1RM)	~0.63 (70% 1RM)	~0.63 (70% 1RM)	~0.47 (80% 1RM)	~0.47 (80% 1RM)	~0.47 (80% 1RM)	~0.47 (80% 1RM)
<i>Realizado</i>								
<b>PV (%)</b>	15.5 ± 1.8	25.2 ± 1.4	40.0 ± 2.8	54.1 ± 2.5	15.3 ± 1.7	25.0 ± 2.7	40.3 ± 2.5	56.8 ± 4.0
<b>VMP promedio (m·s<sup>-1</sup>)</b>	0.63 ± 0.03 (~69.3% 1RM)	0.63 ± 0.02 (~69.2% 1RM)	0.62 ± 0.02 (~69.9% 1RM)	0.63 ± 0.02 (~69.3% 1RM)	0.48 ± 0.02 (~79.0% 1RM)	0.49 ± 0.02 (~78.8% 1RM)	0.49 ± 0.02 (~78.4% 1RM)	0.49 ± 0.02 (~78.5% 1RM)
<b>Promedio de Rep</b>	3.1 ± 0.6	4.1 ± 0.7	6.1 ± 1.5	7.6 ± 1.5	2.2 ± 0.2	3.3 ± 0.3	4.4 ± 0.7	5.4 ± 1.2
PEF: Protocolo de entrenamiento de fuerza; VMP: Velocidad media propulsiva; PV: Pérdida de velocidad; Rep: Repeticiones; 1RM: Una repetición máxima								

**Tabla 24.** Pérdidas de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$ , concentración de lactato y pérdidas de altura de salto después de cada protocolo de entrenamiento de fuerza.

	Pérdida de VMP con la $C1m \cdot s^{-1}$		LAC ( $mmol/L^{-1}$ )		Pérdida de CMJ (%)
	SQ	PB	SQ	PB	
PEF 1	14.0 ± 7.7	14.0 ± 5.3	3.5 ± 1.9	2.6 ± 0.5	13.8 ± 3.7
PEF 2	16.0 ± 7.2	20.5 ± 5.0	6.7 ± 2.8	3.3 ± 0.9 ***	18.1 ± 5.7
PEF 3	25.1 ± 8.2	37.7 ± 9.9 **	8.3 ± 3.1	4.5 ± 1.1 **	23.5 ± 7.7
PEF 4	31.5 ± 8.5	46.0 ± 11.7 **	9.7 ± 2.7	5.4 ± 0.9 ***	29.6 ± 7.8
PEF 5	14.4 ± 5.1	13.1 ± 5.5	3.9 ± 1.6	2.6 ± 0.4 *	14.9 ± 3.0
PEF 6	15.9 ± 6.7	18.5 ± 5.9	4.6 ± 1.7	3.1 ± 0.5 *	16.3 ± 4.9
PEF 7	20.4 ± 6.9	24.1 ± 7.4	5.2 ± 2.1	4.0 ± 0.7 *	19.2 ± 5.8
PEF 8	24.0 ± 10.1	37.1 ± 12.3 **	7.5 ± 2.0	4.6 ± 0.9 ***	24.2 ± 8.1
PEF 9	10.2 ± 5.9	12.3 ± 4.0	2.9 ± 0.9	2.6 ± 0.4	11.9 ± 3.5
PEF 10	14.9 ± 7.5	18.2 ± 7.2	4.2 ± 1.5	2.9 ± 0.4 *	15.3 ± 4.4
PEF 11	16.5 ± 7.6	24.5 ± 7.8 *	4.6 ± 1.7	3.8 ± 0.5	17.1 ± 4.0
PEF 12	18.0 ± 9.3	31.2 ± 5.6 **	5.4 ± 1.6	4.9 ± 1.1	19.9 ± 5.6
PEF 13	11.6 ± 6.3	10.3 ± 3.4	2.5 ± 0.8	2.4 ± 0.4	11.3 ± 2.7
PEF 14	15.0 ± 5.4	14.2 ± 7.6	3.2 ± 1.0	2.9 ± 0.6	14.8 ± 3.3
PEF 15	14.6 ± 5.0	18.1 ± 7.9	3.8 ± 2.0	3.5 ± 0.5	14.9 ± 4.1
PEF 16	18.6 ± 6.7	25.3 ± 6.8 *	4.7 ± 2.0	4.5 ± 0.8	16.3 ± 3.8

PEF: Protocolo de entrenamiento de fuerza; VMP: Velocidad media propulsiva; SQ: Sentadilla completa; PB: Press de banca; LAC: Concentración sanguínea de lactato post-esfuerzo; CMJ: Salto con contramovimiento.

Todos los valores de lactato Post-esfuerzo fueron significativamente diferentes de los valores Pre-esfuerzo ( $P < 0.001$ ) para todos los PEFs.

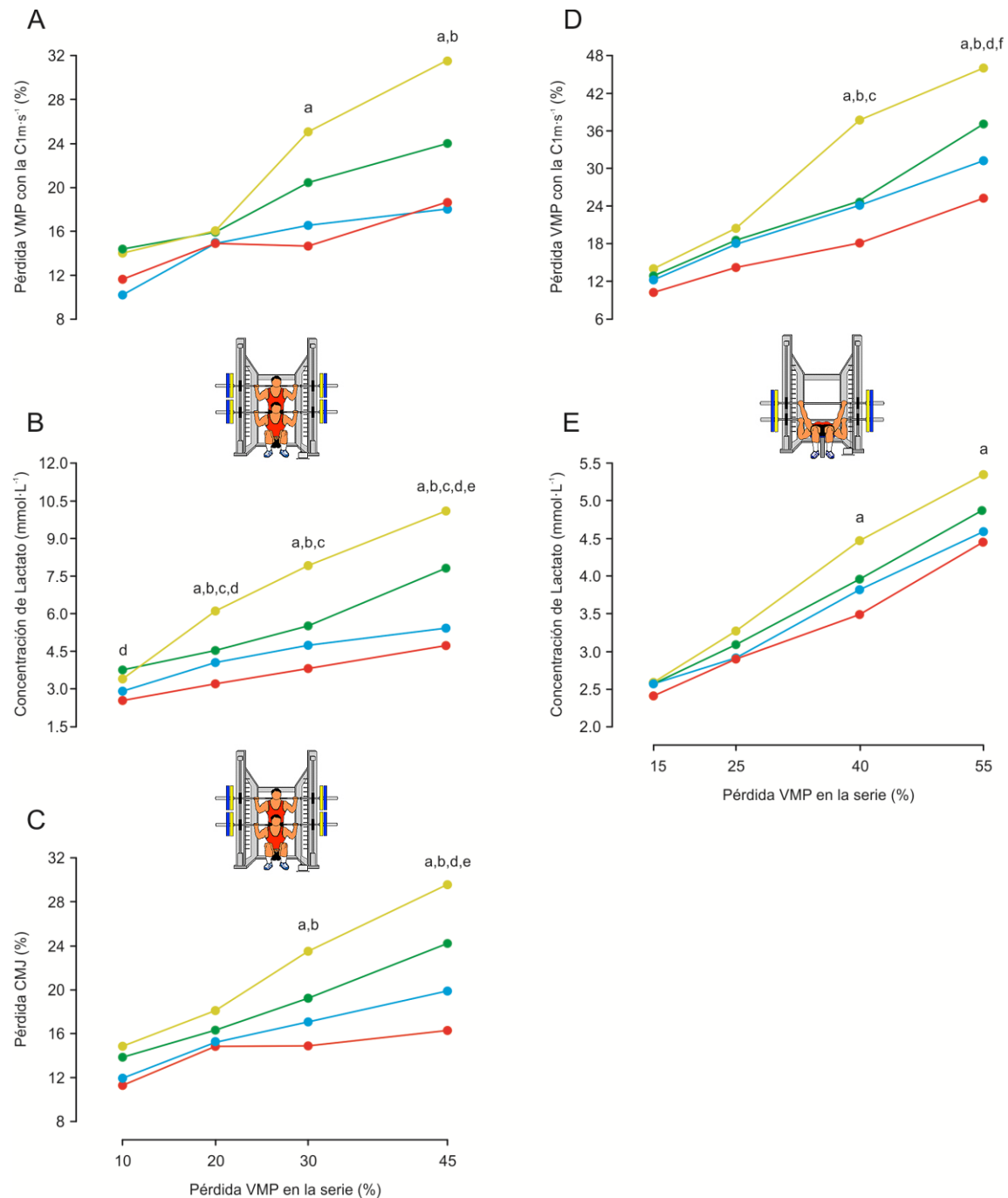
Diferencias estadísticamente significativas con respecto a SQ: \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ .

### 5.2.2. Pérdida de altura de salto vertical (CMJ)

Se observó una clara tendencia a aumentar la pérdida de salto a medida que aumentaba el porcentaje de pérdida de velocidad dentro de la serie con cada intensidad relativa. El incremento de la pérdida de altura de salto con el porcentaje de pérdida de velocidad en la serie fue menor a medida que aumentó la intensidad relativa (**Figura 34C**).

### 5.2.3. Cambios en las variables medidas durante el test de carrera de 20 m

Todas las variables analizadas durante el test de carrera en 20 m experimentaron un cambio en sentido negativo después de cada PEF, excepto la variable LP, la cual no mostró cambios significativos en ninguno de los PEFs realizados en el presente estudio (**Tabla 25**). Al igual que las variables comentadas anteriormente, esos cambios fueron mayores a medida que incrementó el porcentaje de pérdida de velocidad dentro de la serie con cada una de las intensidades relativas utilizadas.



**Figura 34.** Pérdidas de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$ , concentración de lactato y pérdidas de altura de salto en relación con la pérdida de velocidad media obtenida en cada protocolo de entrenamiento de fuerza en los ejercicios de **sentadilla completa (A, B y C)** y **press de banca (D y E)**. Cada intensidad relativa está representada con un color diferente: Amarillo (50% 1RM); Verde (60% 1RM); Azul (70% 1RM); Rojo (80% 1RM).<sup>a</sup> Diferencias significativas entre 50% y 80% 1RM; <sup>b</sup> Diferencias significativas entre 50% y 70% 1RM; <sup>c</sup> Diferencias significativas entre 50% y 60% 1RM; <sup>d</sup> Diferencias significativas entre 60% y 80% 1RM; <sup>e</sup> Diferencias significativas entre 60% y 70% 1RM; <sup>f</sup> Diferencias significativas entre 70% y 80% 1RM.

**Tabla 25.** Cambios en las variables obtenidas durante el test de carrera en 20 m.

	Cambio en T10 (%)	Cambio en T20 (%)	Cambio en TC (%)	Cambio en LP (%)	Cambio en V5 m (%)	Cambio en V10 m (%)	Cambio en V15 m (%)	Cambio en V20 m (%)
PEF 1	2.1 ± 1.4	2.8 ± 2.6	3.6 ± 4.9	1.5 ± 3.3	-2.7 ± 3.6	-0.5 ± 4.1	-2.8 ± 3.0	-3.1 ± 3.3
PEF 2	3.5 ± 2.1	3.5 ± 1.9	5.4 ± 4.2	-0.8 ± 2.1	-3.8 ± 1.9	-2.6 ± 2.7	-2.8 ± 2.9	-4.1 ± 1.6
PEF 3	8.1 ± 7.4	7.7 ± 6.8	9.7 ± 9.9	-0.1 ± 3.1	-5.4 ± 5.5	-5.1 ± 4.8	-6.6 ± 6.2	-7.6 ± 7.4
PEF 4	10.8 ± 10.5	9.8 ± 9.8	14.2 ± 12.4	-1.0 ± 3.5	-9.6 ± 7.1	-6.8 ± 6.8	-7.5 ± 6.2	-9.2 ± 6.6
PEF 5	3.7 ± 3.0	3.9 ± 2.3	4.5 ± 4.0	-2.0 ± 3.3	-2.7 ± 2.5	-3.5 ± 0.9	-3.8 ± 2.6	-4.8 ± 1.6
PEF 6	2.7 ± 1.8	3.6 ± 1.4	4.7 ± 5.5	-1.4 ± 2.3	-3.3 ± 2.2	-2.6 ± 2.7	-3.0 ± 3.3	-4.1 ± 1.6
PEF 7	4.3 ± 3.2	4.0 ± 2.2	8.7 ± 7.1	-0.4 ± 2.7	-4.6 ± 3.8	-3.5 ± 2.8	-3.2 ± 3.9	-4.8 ± 3.4
PEF 8	4.5 ± 3.3	5.5 ± 2.9	6.2 ± 3.0	0.2 ± 1.7	-7.2 ± 3.3	-5.7 ± 3.0	-6.2 ± 2.5	-7.5 ± 3.3
PEF 9	1.8 ± 3.9	3.3 ± 3.0	5.5 ± 3.6	-0.8 ± 2.8	-2.4 ± 4.4	-3.8 ± 3.5	-4.3 ± 4.4	-4.4 ± 3.4
PEF 10	4.3 ± 2.8	4.4 ± 1.9	3.5 ± 4.6	-1.2 ± 3.0	-5.9 ± 4.2	-3.0 ± 3.7	-4.6 ± 3.2	-4.4 ± 3.0
PEF 11	6.0 ± 4.1	5.0 ± 3.6	5.6 ± 4.2	-1.8 ± 1.6	-5.5 ± 5.6	-4.2 ± 2.1	-4.1 ± 3.5	-5.1 ± 4.4
PEF 12	5.9 ± 3.8	5.5 ± 2.5	4.4 ± 3.2	-0.3 ± 2.0	-4.4 ± 2.9	-4.5 ± 2.8	-4.6 ± 2.2	-4.7 ± 3.7
PEF 13	3.7 ± 3.3	4.8 ± 3.5	6.3 ± 4.4	-0.7 ± 3.4	-3.2 ± 4.4	-3.5 ± 4.4	-4.4 ± 2.8	-2.6 ± 3.5
PEF 14	4.3 ± 4.2	4.8 ± 3.9	7.9 ± 7.7	-1.0 ± 2.4	-4.0 ± 1.9	-5.1 ± 3.0	-4.7 ± 2.8	-5.0 ± 3.9
PEF 15	4.8 ± 2.8	4.7 ± 2.7	6.8 ± 3.9	-1.2 ± 2.9	-5.0 ± 5.4	-4.7 ± 2.8	-3.2 ± 2.1	-3.9 ± 3.7
PEF 16	6.8 ± 3.0	6.0 ± 3.3	7.8 ± 6.0	-1.9 ± 3.0	-5.0 ± 2.7	-6.5 ± 4.2	-4.5 ± 4.2	-7.0 ± 4.0

PEF: Protocolo de entrenamiento de fuerza; T10: Tiempo en recorrer 10 m; T20: Tiempo en recorrer 20 m; TC: Tiempo de contacto; LP: Longitud de paso; V5 m: Velocidad alcanzada a los 5 m; V10 m: Velocidad alcanzada a los 10 m; V15 m: Velocidad alcanzada a los 15 m; V20 m: Velocidad alcanzada a los 20 m.

### 5.2.4. Cambios en la EMG

A diferencia de la mayoría de las variables mecánicas analizadas para estimar el grado de fatiga después de cada PEF, muchas de las variables de EMG no mostraron una tendencia a incrementar sus valores de cambio a medida que incrementó el porcentaje de pérdida de velocidad alcanzado dentro de cada serie de entrenamiento ante una intensidad relativa determinada (**Tablas 26 y 27**). Solo las variables  $F_{med}$ ,  $F_{media}$  e ID mostraron esta tendencia y, además, los valores de cambio ante la misma pérdida de velocidad fueron mayores cuanto menor fue la intensidad relativa utilizada. Este comportamiento fue similar para los dos músculos analizados (RF y VL).

**Tabla 26.** Cambios en la actividad eléctrica muscular después de cada protocolo de entrenamiento de fuerza en el músculo **Recto femoral**.

	RMS	iEMG	F <sub>med</sub>	F <sub>media</sub>	F <sub>max</sub>	ID	TDW7	TDW 6	TDW5	TDW4	TDW3	TDW2
PEF 1	-4.8 ± 17.1	-8.6 ± 13.1	-4.1 ± 6.1	-3.3 ± 4.5	-11.4 ± 13.8	13.1 ± 26.1	18.7 ± 33.1	6.6 ± 25.8	5.7 ± 18.6	5.4 ± 14.4	5.4 ± 13.1	1.6 ± 12.0
PEF 2	-2.3 ± 8.9	0.7 ± 15.4	-7.5 ± 6.5	-6.8 ± 3.8	-9.2 ± 13.9	25.0 ± 16.0	24.0 ± 33.5	30.0 ± 24.4	7.6 ± 6.4	8.9 ± 7.6	5.4 ± 6.0	2.0 ± 3.8
PEF 3	-4.7 ± 9.0	0.0 ± 16.7	-9.6 ± 9.4	-9.1 ± 6.7	-10.7 ± 16.1	66.1 ± 54.2	0.6 ± 21.3	6.0 ± 19.0	6.0 ± 16.4	12.6 ± 20.3	7.9 ± 16.0	1.8 ± 12.3
PEF 4	-7.9 ± 12.8	-5.6 ± 14.7	-7.2 ± 2.1	-7.7 ± 4.3	1.2 ± 16.6	60.2 ± 34.9	9.3 ± 26.2	3.8 ± 21.9	2.7 ± 22.7	16.2 ± 29.4	9.1 ± 27.2	3.4 ± 21.6
PEF 5	-6.0 ± 9.6	-10.4 ± 16.0	-5.3 ± 7.4	-4.6 ± 5.4	0.3 ± 30.6	21.4 ± 33.3	10.1 ± 27.0	10.3 ± 9.3	7.4 ± 16.0	6.5 ± 11.6	3.4 ± 14.7	1.5 ± 10.7
PEF 6	-6.4 ± 12.7	-9.5 ± 12.3	-4.2 ± 7.0	-3.4 ± 4.7	-5.3 ± 28.3	17.5 ± 27.1	5.1 ± 15.8	11.5 ± 17.4	10.3 ± 16.2	9.0 ± 10.2	4.6 ± 14.2	3.2 ± 13.5
PEF 7	-6.4 ± 8.8	-8.6 ± 8.7	-7.4 ± 6.8	-5.7 ± 5.0	-9.9 ± 18.5	28.8 ± 33.9	-4.0 ± 23.1	-3.5 ± 12.5	-0.2 ± 12.9	-1.4 ± 10.5	1.8 ± 12.4	-0.3 ± 11.2
PEF 8	-6.1 ± 10.6	-11.0 ± 11.6	-4.8 ± 8.3	-5.3 ± 4.9	-3.2 ± 8.9	35.0 ± 24.2	22.7 ± 29.4	17.4 ± 25.9	8.1 ± 14.7	10.2 ± 10.2	6.4 ± 8.7	3.1 ± 9.6
PEF 9	-4.2 ± 8.4	-6.3 ± 5.8	-4.8 ± 6.3	-3.1 ± 3.6	-5.3 ± 10.7	11.9 ± 20.3	1.5 ± 27.0	1.7 ± 14.3	-0.2 ± 10.5	-0.5 ± 5.8	1.4 ± 7.3	0.3 ± 6.3
PEF 10	-5.5 ± 9.5	-11.8 ± 6.3	-2.6 ± 9.9	-2.4 ± 6.5	-4.1 ± 15.3	16.3 ± 25.6	1.3 ± 25.9	-2.0 ± 11.5	0.5 ± 12.4	3.2 ± 14.4	3.3 ± 12.3	1.2 ± 9.8
PEF 11	-6.2 ± 12.3	-11.4 ± 11.9	-6.3 ± 3.5	-4.1 ± 4.1	-10.2 ± 14.5	19.2 ± 25.4	1.9 ± 37.5	13.6 ± 27.0	11.2 ± 21.0	11.6 ± 18.7	9.4 ± 15.7	4.3 ± 15.0
PEF 12	-6.1 ± 5.4	-8.8 ± 9.2	-5.4 ± 6.1	-4.9 ± 3.1	-10.7 ± 15.1	23.4 ± 11.7	23.0 ± 44.1	6.0 ± 15.1	7.3 ± 13.1	9.9 ± 11.9	6.2 ± 5.6	1.0 ± 7.8
PEF 13	-2.6 ± 5.0	-11.6 ± 4.4	-2.0 ± 5.7	-2.8 ± 3.7	-7.4 ± 18.8	14.9 ± 16.3	14.3 ± 35.9	17.4 ± 22.7	7.0 ± 11.2	8.1 ± 6.9	6.1 ± 9.3	2.3 ± 8.0
PEF 14	-5.9 ± 7.7	-9.6 ± 9.3	-3.7 ± 3.4	-3.9 ± 2.5	0.7 ± 21.4	17.1 ± 18.4	15.9 ± 29.9	13.3 ± 15.1	11.7 ± 16.3	14.2 ± 11.6	9.0 ± 11.9	5.3 ± 11.7
PEF 15	-3.2 ± 7.8	-6.8 ± 14.9	-4.6 ± 5.3	-4.7 ± 4.1	-7.2 ± 15.4	19.4 ± 18.9	2.6 ± 19.4	6.3 ± 21.0	9.7 ± 15.2	8.4 ± 13.2	4.8 ± 12.0	2.5 ± 9.3
PEF 16	-6.6 ± 6.5	-10.0 ± 8.9	-5.7 ± 6.2	-4.4 ± 3.1	-10.1 ± 19.9	23.8 ± 16.5	13.0 ± 19.6	7.6 ± 16.2	3.4 ± 9.3	6.9 ± 11.0	0.2 ± 8.1	-0.4 ± 7.2

PEF: Protocolo de entrenamiento de fuerza; RMS: Root mean square; iEMG: Integran de la EMG; F<sub>med</sub>: Frecuencia mediana; F<sub>media</sub>: Frecuencia media; F<sub>max</sub>: Frecuencia máxima; ID: Índice de Dimitrov; TDW: Transformada discreta de wavelet en los dominios del 2 al 7.

Tabla 27. Cambios en la actividad eléctrica muscular después de cada protocolo de entrenamiento de fuerza en el músculo Vasto Lateral.

	RMS	iEMG	F <sub>med</sub>	F <sub>media</sub>	F <sub>max</sub>	ID	TDW7	TDW 6	TDW5	TDW4	TDW3	TDW2
PEF 1	-6.1 ± 16.8	-9.5 ± 15.2	-3.3 ± 5.1	-2.8 ± 5.2	-5.8 ± 13.1	19.7 ± 33.3	3.0 ± 23.7	0.3 ± 24.4	0.0 ± 14.2	3.0 ± 13.5	1.3 ± 9.3	0.2 ± 7.7
PEF 2	-8.3 ± 4.4	-6.0 ± 10.9	-6.6 ± 4.6	-5.2 ± 4.1	-2.5 ± 16.2	33.0 ± 34.5	4.7 ± 25.1	-1.0 ± 14.6	-0.1 ± 13.5	0.8 ± 14.2	-2.4 ± 8.6	-2.8 ± 5.4
PEF 3	-4.8 ± 8.5	-0.6 ± 13.8	-10.7 ± 7.6	-10.4 ± 7.4	-7.6 ± 16.1	106.7 ± 124.7	22.1 ± 31.4	13.8 ± 14.2	9.3 ± 11.8	14.2 ± 13.2	9.4 ± 11.6	3.9 ± 10.9
PEF 4	-1.7 ± 14.2	0.7 ± 17.5	-12.5 ± 9.5	-14.0 ± 8.4	-10.0 ± 11.4	201.9 ± 218.8	19.8 ± 29.3	14.9 ± 26.6	17.4 ± 25.6	24.0 ± 26.9	17.4 ± 27.0	10.6 ± 23.4
PEF 5	-3.6 ± 6.2	-7.7 ± 16.5	-1.6 ± 6.6	-2.7 ± 4.2	-6.9 ± 16.9	18.4 ± 22.4	11.2 ± 19.6	8.4 ± 20.6	8.1 ± 14.2	8.7 ± 15.9	5.3 ± 11.8	5.4 ± 9.8
PEF 6	-6.4 ± 5.0	-9.1 ± 8.3	-5.8 ± 6.0	-5.8 ± 5.1	-9.4 ± 13.0	32.1 ± 34.6	20.5 ± 28.6	3.9 ± 7.3	3.4 ± 12.1	8.6 ± 12.4	3.0 ± 9.9	-0.4 ± 7.4
PEF 7	-6.0 ± 10.5	-7.9 ± 12.6	-6.9 ± 6.8	-5.9 ± 6.3	-7.1 ± 9.5	63.6 ± 107.8	12.6 ± 28.0	7.6 ± 25.1	5.9 ± 16.3	8.6 ± 19.3	5.2 ± 16.3	0.7 ± 12.4
PEF 8	-1.2 ± 15.7	-6.9 ± 13.5	-12.5 ± 7.6	-12.3 ± 5.2	-15.1 ± 14.1	83.7 ± 45.4	13.9 ± 17.1	16.6 ± 12.8	12.3 ± 12.8	22.3 ± 13.9	12.9 ± 12.8	8.2 ± 13.8
PEF 9	-3.7 ± 9.2	-5.7 ± 7.7	-6.2 ± 5.2	-3.6 ± 3.2	-4.5 ± 15.4	19.0 ± 31.7	0.0 ± 26.3	0.1 ± 10.8	-0.1 ± 9.4	0.8 ± 9.1	2.6 ± 8.5	-1.0 ± 6.6
PEF 10	-6.8 ± 5.9	-12.6 ± 8.2	-4.9 ± 4.8	-5.4 ± 4.7	-5.3 ± 11.3	34.1 ± 31.6	23.8 ± 33.1	9.3 ± 19.6	4.2 ± 11.7	8.3 ± 16.9	4.8 ± 9.3	1.8 ± 7.8
PEF 11	-8.1 ± 14.3	-13.2 ± 14.6	-4.3 ± 5.1	-3.6 ± 3.5	-9.2 ± 14.3	20.8 ± 24.0	15.1 ± 38.6	9.5 ± 23.4	8.9 ± 25.2	8.7 ± 21.6	4.6 ± 22.2	1.7 ± 19.8
PEF 12	-3.3 ± 10.9	-6.2 ± 12.2	-4.8 ± 7.8	-4.6 ± 4.5	2.3 ± 26.0	32.7 ± 26.7	16.7 ± 35.6	14.3 ± 24.1	8.7 ± 17.6	14.1 ± 16.3	7.2 ± 15.1	4.6 ± 14.2
PEF 13	-4.1 ± 6.7	-12.4 ± 8.3	-6.4 ± 5.3	-4.8 ± 4.9	-5.7 ± 14.2	20.0 ± 27.5	19.0 ± 42.1	5.6 ± 22.8	8.3 ± 15.0	10.0 ± 14.9	8.0 ± 15.0	4.5 ± 10.9
PEF 14	-2.9 ± 6.7	-7.0 ± 6.5	-7.5 ± 6.7	-6.4 ± 5.5	-9.5 ± 16.1	33.5 ± 26.2	4.2 ± 33.9	14.6 ± 24.8	10.2 ± 16.3	10.7 ± 9.6	11.7 ± 12.1	6.9 ± 11.2
PEF 15	-4.9 ± 4.9	-8.0 ± 12.6	-5.1 ± 6.1	-5.6 ± 4.6	-8.1 ± 11.3	31.7 ± 34.8	5.5 ± 9.0	5.2 ± 16.7	6.2 ± 13.0	10.3 ± 13.2	4.4 ± 7.2	2.2 ± 7.8
PEF 16	-5.1 ± 8.3	-8.2 ± 11.8	-10.4 ± 7.3	-9.0 ± 5.2	-8.6 ± 12.5	54.4 ± 30.0	17.4 ± 45.0	7.8 ± 19.0	2.6 ± 16.3	6.3 ± 10.3	6.0 ± 10.5	1.4 ± 8.5

PEF: Protocolo de entrenamiento de fuerza; RMS: Root mean square; iEMG: Integran de la EMG; F<sub>med</sub>: Frecuencia mediana; F<sub>media</sub>: Frecuencia media; F<sub>max</sub>: Frecuencia máxima; ID: Índice de Dimitrov; TDW: Transformada discreta de wavelet en los dominios del 2 al 7.

### 5.2.5. Relaciones entre los cambios en las variables medidas para estimar el grado de fatiga después de diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza

Para analizar si los valores medios de cambio de cada una de las variables utilizadas para estimar la fatiga producido por cada PEF mostraban relación con el esfuerzo realizado durante las sesiones de entrenamiento, fue necesario calcular una variable que indicara el *grado de esfuerzo* que supuso cada PEF. Dado que dicho grado de esfuerzo está determinado por la velocidad de la primera repetición de la serie y por la pérdida de velocidad dentro de cada serie de entrenamiento, obtuvimos el producto entre la mejor velocidad de la primera serie de entrenamiento y la media de la pérdida de las tres series de entrenamiento realizadas en cada PEF. El valor obtenido de dicha multiplicación se denominó *índice de esfuerzo* (IE).

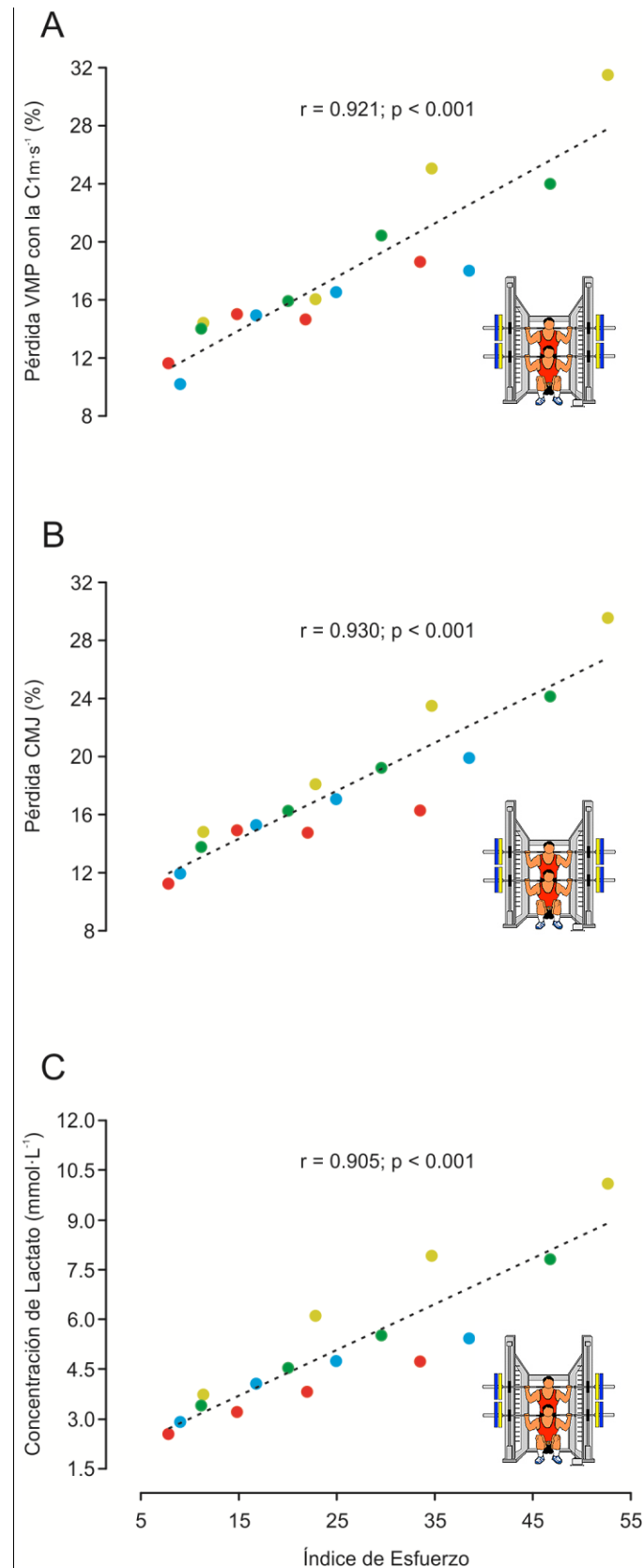
#### A. Relaciones entre el índice de esfuerzo y los cambios en las variables mecánicas

Se encontró una alta relación entre el IE y la pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  en los PEF realizados en el ejercicio de sentadilla completa ( $r = 0.92$ ; **Figuras 35A**) y press de banca ( $r = 0.98$ ; **Figuras 36A**).

Para los PEFs realizados en el ejercicio de sentadilla completa también se encontró una alta relación entre el IE y la pérdida de altura de salto ( $r = 0.93$ ; **Figura 35B**). Además, el IE mostró relaciones moderadas-altas con los cambios en todas las variables analizadas durante el test de carrera en 20 m (T10:  $r = 0.78$ ; T20:  $r = 0.77$ ; TC:  $r = 0.67$ ; V5 m:  $r = -0.82$ ; V10 m:  $r = -0.69$ ; V15 m:  $r = -0.67$ ; V20 m:  $r = -0.84$ ) (**Figura 37**).

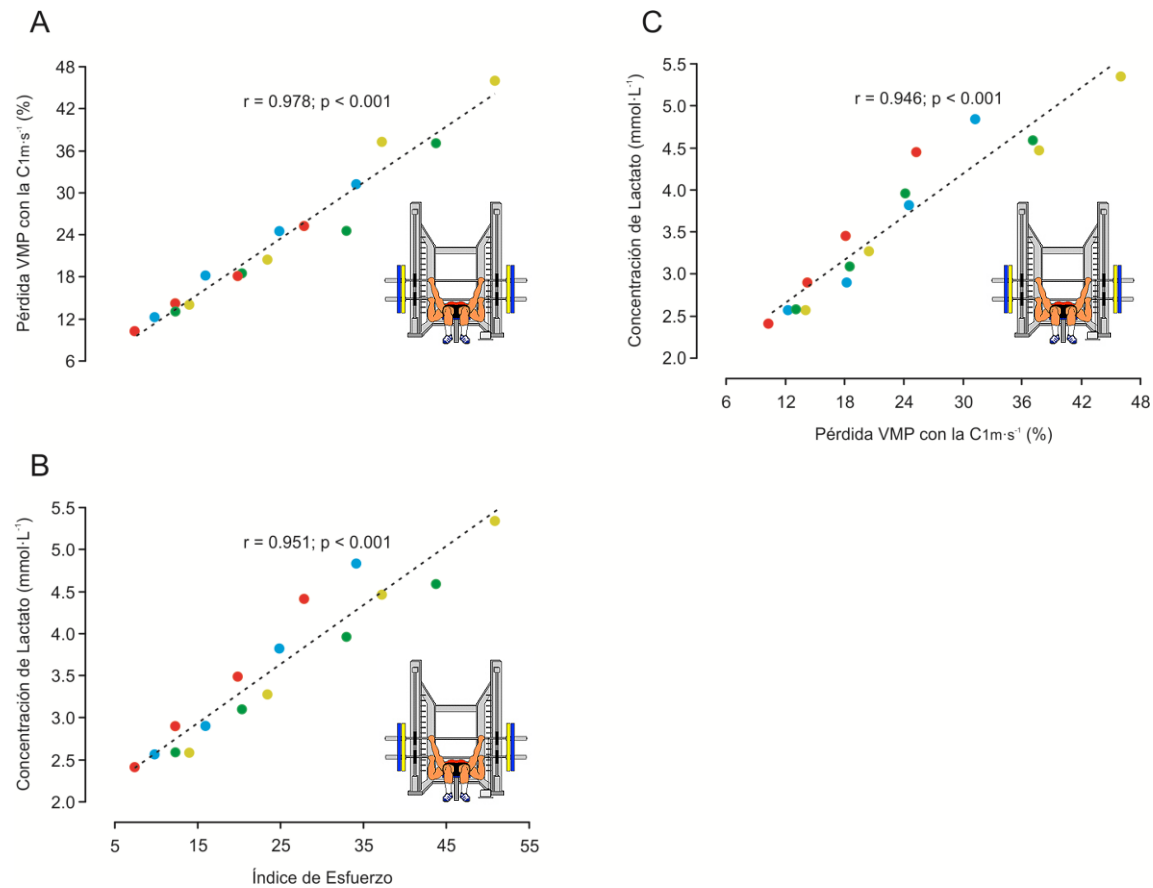
#### B. Relación entre el índice de esfuerzo y la concentración sanguínea de lactato

El IE mostró una alta correlación lineal positiva con la concentración sanguínea de lactato, tanto en los PEFs realizados en el ejercicio de sentadilla completa ( $r = 0.91$ ) como en los realizados en el ejercicio de press de banca ( $r = 0.95$ ) (**Figuras 35C y 36B**).



**Figura 35.** Correlaciones entre el índice de esfuerzo y **(A)** las pérdidas de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$ , **(B)** la pérdida de altura de salto y **(C)** la concentración sanguínea de lactato para los PEF realizados en el ejercicio de **sentadilla completa**. Cada intensidad relativa está representada con un color diferente: Amarillo (50% 1RM); Verde (60% 1RM); Azul (70% 1RM); Rojo (80% 1RM).

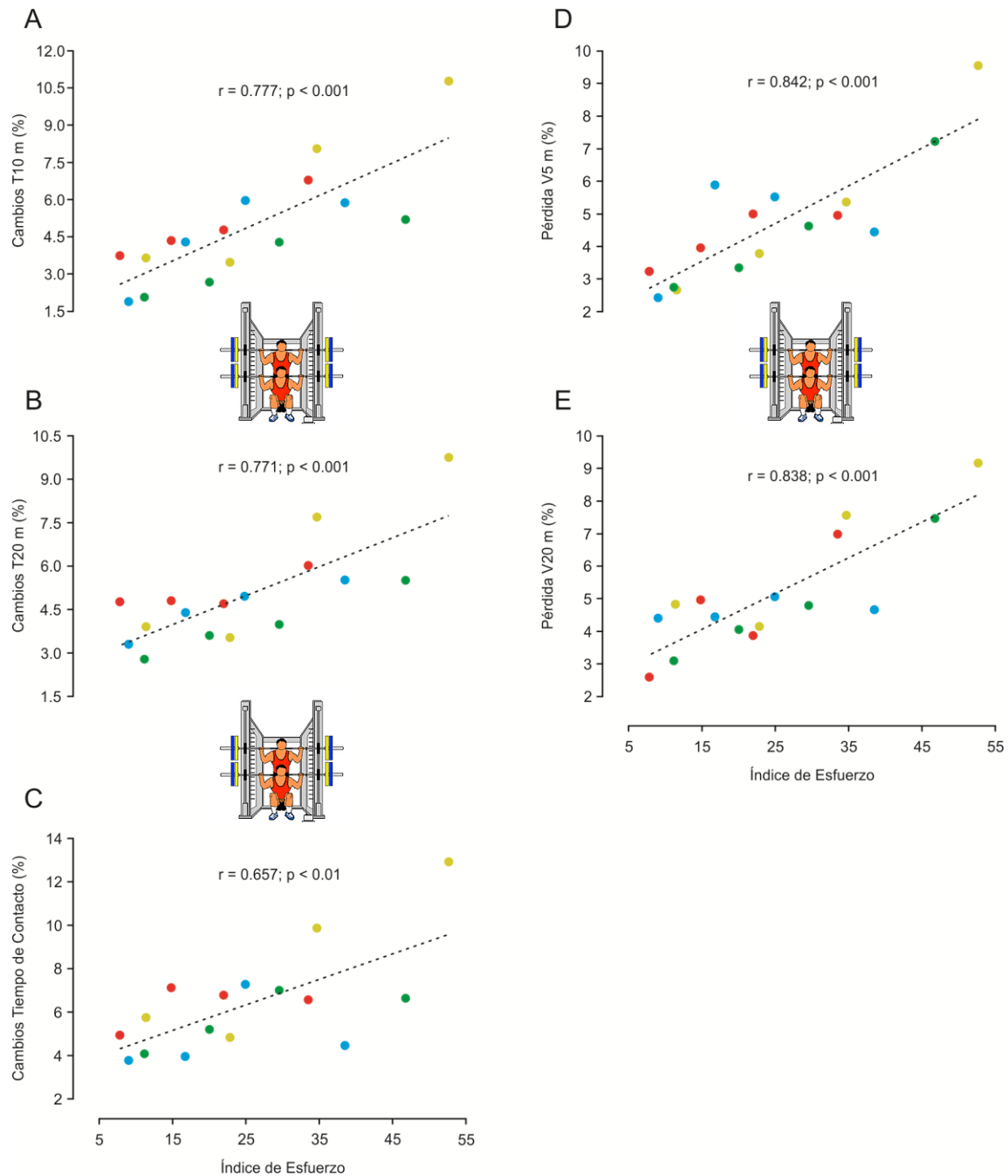




**Figura 36.** Correlaciones entre el índice de esfuerzo y (A) las pérdidas de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y (B) la concentración sanguínea de lactato, y correlación entre las pérdidas de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y la concentración sanguínea de lactato (C) para los PEF realizados en el ejercicio de **press de banca**. Cada intensidad relativa está representada con un color diferente: Amarillo (50% 1RM); Verde (60% 1RM); Azul (70% 1RM); Rojo (80% 1RM).

### C. Relaciones entre el índice de esfuerzo y los cambios en las variables de EMG

Las relaciones entre el índice de esfuerzo y las variables de EMG de los músculos RF y VL aparecen en la **Tabla 28**. En el músculo RF, el IE mostró relaciones negativas significativas con los cambios en la RMS, la  $F_{med}$ , la  $F_{media}$  y el ID. En el músculo VL, el IE mostró relaciones negativas significativas con los cambios en la iEMG, la  $F_{med}$ , la  $F_{media}$  y el ID, y relaciones positivas significativas con los cambios en la transformada discreta de wavelet en los dominios del 2 al 6.



**Figura 37.** Correlaciones entre el índice de esfuerzo en el ejercicio de **sentadilla completa** y los cambios en las variables medidas durante el test de carrera en 20 m (**A:** T10; **B:** T20; **C:** TC; **D:** V5 m; **E:** V20 m). Cada intensidad relativa está representada con un color diferente: Amarillo (50% 1RM); Verde (60% 1RM); Azul (70% 1RM); Rojo (80% 1RM).

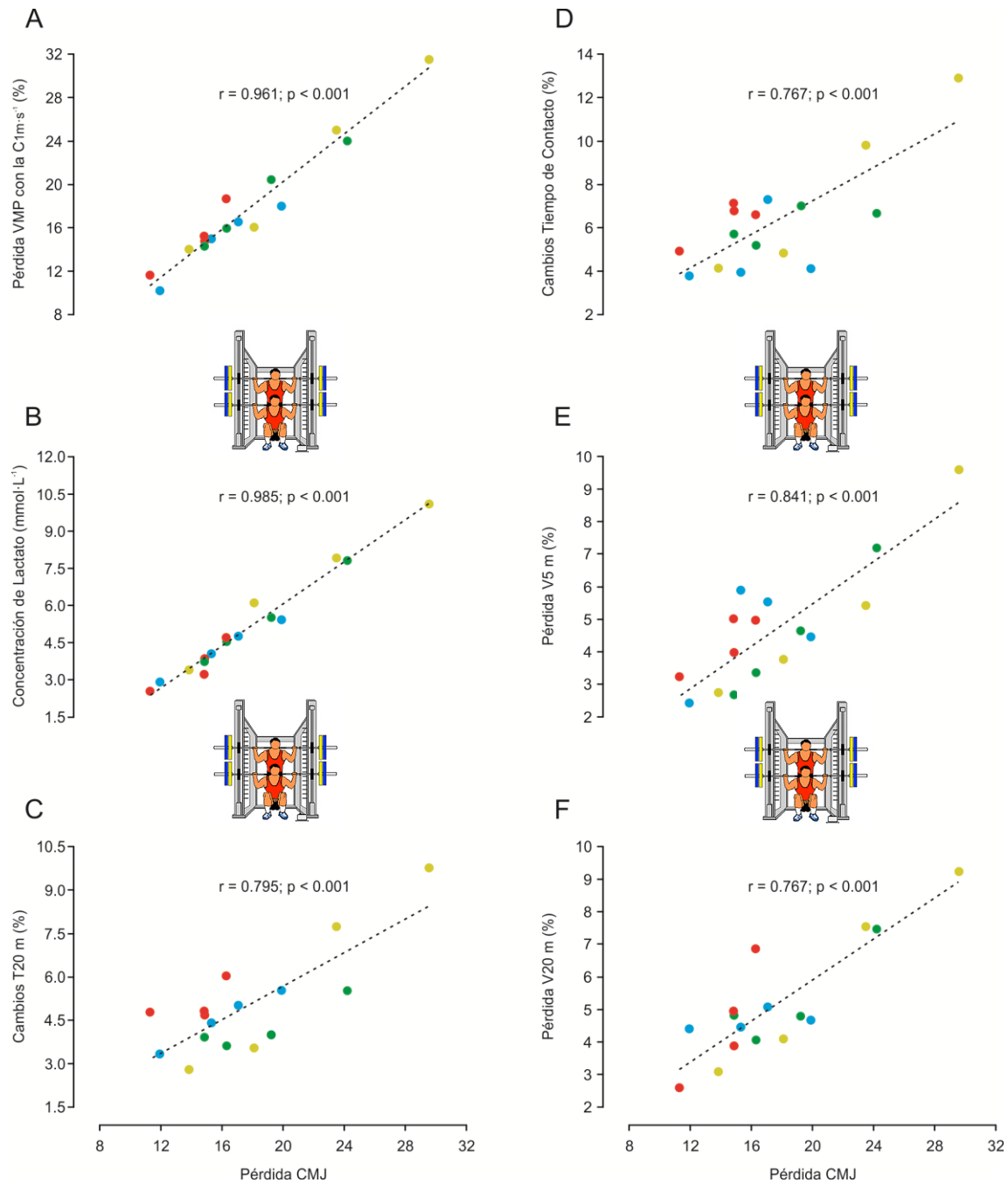
**Tabla 28.** Correlación entre el índice de esfuerzo y los cambios en las variables de EMG analizadas en los músculos RF y VL.

	RF	VL
<b>RMS</b>	-0.54 *	0.38
<b>iEMG</b>	0.20	0.58 *
<b>F<sub>med</sub></b>	-0.55 *	-0.74 ***
<b>F<sub>media</sub></b>	-0.68 **	-0.83 ***
<b>F<sub>max</sub></b>	0.03	-0.28
<b>ID</b>	0.75 ***	0.80 ***
<b>TDW7</b>	0.15	0.43
<b>TDW6</b>	-0.07	0.66 **
<b>TDW5</b>	-0.07	0.62 *
<b>TDW4</b>	0.47	0.77 ***
<b>TDW3</b>	0.29	0.61 *
<b>TDW2</b>	0.05	0.52 *

RF: Recto femoral; VL: Vasto lateral; RMS: Root mean square; iEMG: Integran de la EMG; F<sub>med</sub>: Frecuencia mediana; F<sub>media</sub>: Frecuencia media; F<sub>max</sub>: Frecuencia máxima; ID: Índice de Dimitrov; TDW: Transformada discreta de wavelet en los dominios del 2 al 7.

#### D. Relaciones entre los cambios en las variables mecánicas y metabólicas

La pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  presentó una alta correlación con la concentración sanguínea de lactato post-esfuerzo en ambos ejercicios, sentadilla completa ( $r = 0.95$ ;  $p < 0.001$ ) y press de banca ( $r = 0.95$ ; **Figura 36C**). Para los esfuerzos realizados en el ejercicio de sentadilla completa, la pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  también mostró relaciones significativas con la pérdida de CMJ y los cambios en todas las variables analizadas durante el test de carrera en 20 m (T10:  $r = 0.85$ ,  $p < 0.001$ ; T20:  $r = 0.85$ ,  $p < 0.001$ ; TC:  $r = 0.84$ ,  $p < 0.001$ ; V5 m:  $r = -0.85$ ,  $p < 0.001$ ; V10 m:  $r = -0.65$ ,  $p < 0.01$ ; V15 m:  $r = -0.75$ ,  $p < 0.01$ ; V20 m:  $r = -0.91$ ,  $p < 0.001$ ). Del mismo modo, las pérdidas de CMJ mostraron relaciones significativas con la concentración sanguínea de lactato post-esfuerzo y las variables mecánicas obtenidas durante el test de carrera en 20 m (**Figura 38**).



**Figura 38.** Correlaciones entre la pérdida de CMJ y (A) las pérdidas de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$ , (B) la concentración sanguínea de lactato y los cambios en las variables medidas durante el test de carrera en 20 m (C: T20; D: TC; E: V5 m; F: V20 m). Cada intensidad relativa está representada con un color diferente: Amarillo (50% 1RM); Verde (60% 1RM); Azul (70% 1RM); Rojo (80% 1RM).

### E. Relaciones entre los cambios en las variables mecánicas y metabólicas y los cambios en las variables de EMG

En las **Tabla 29** y **30** aparecen las correlaciones entre los cambios en las variables mecánicas y metabólicas utilizadas para estimar el grado de fatiga después de cada PEF y los cambios en las variables de EMG de los músculos RF y VL, respectivamente. En la **Tabla 29** se puede observar cómo los cambios en el CMJ, la VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$ , las variables medidas durante el test de carrera en 20 m y la concentración sanguínea de lactato post-esfuerzo mostraron correlaciones significativas con los cambios en las variables  $F_{med}$ ,  $F_{media}$ , ID y la TDW en el dominio 4 del músculo RF. Los cambios en la RMS del RF también presentaron correlaciones moderadas ( $r = 0.43 - 0.61$ ) con los cambios en el resto de variables mecánicas y metabólicas analizadas, aunque sólo fueron significativas con los cambios en el CMJ, la VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  y la V20 m (**Tabla 29**). Los cambios en las variables iEMG,  $F_{max}$  y TDW2, 3, 5, 6 y 7 no mostraron correlaciones significativas con los cambios en las variables mecánicas y metabólicas estudiadas.

En cuanto al músculo VL, los cambios en las variables mecánicas y metabólicas analizadas para estimar el grado de fatiga producido por cada PEF mostraron correlaciones significativas con los cambios en todas las variables de EMG examinadas, excepto con la RMS, la  $F_{max}$  y la TDW7 (**Tabla 30**).

**Tabla 29.** Relación entre los cambios en las variables mecánicas y metabólicas y los cambios en variables de EMG del músculo **recto femoral o recto anterior**.

Variables	RMS	iEMG	F <sub>med</sub>	F <sub>media</sub>	F <sub>max</sub>	ID	TDW7	TDW6	TDW5	TDW4	TDW3	TDW2
CMJ	-0.51 *	0.35	-0.64 **	-0.80 ***	0.17	0.88 ***	0.08	-0.05	-0.08	0.53 *	0.44	0.17
C1m·s <sup>-1</sup>	-0.57 *	0.28	-0.63 **	-0.77 ***	0.14	0.89 ***	0.01	-0.13	-0.14	0.51 *	0.35	0.09
Lac	-0.42	0.45	-0.69 **	-0.83 ***	0.12	0.90 ***	0.08	0.02	-0.12	0.50 *	0.39	0.12
T10	-0.47	0.23	-0.54 *	-0.68 **	0.11	0.81 ***	-0.10	-0.18	-0.07	0.63 **	0.44	0.15
T20	-0.43	0.23	-0.46	-0.66 **	0.22	0.85 ***	-0.05	-0.15	-0.08	0.66 **	0.47	0.20
TC	-0.44	0.31	-0.58 *	-0.73 **	0.30	0.84 ***	-0.23	-0.12	0.01	0.62 **	0.51 *	0.34
V5	0.49	-0.05	0.31	0.50 *	-0.28	-0.68 **	0.05	0.15	0.13	-0.50 *	-0.42	-0.26
V10	0.42	-0.02	0.30	0.44	-0.32	-0.55 *	0.03	0.09	0.01	-0.48	-0.19	-0.13
V15	0.42	-0.10	0.28	0.51 *	-0.39	-0.77 ***	-0.01	0.15	0.15	-0.55 *	-0.45	-0.23
V20	0.61 *	-0.23	0.58 *	0.68 **	-0.30	-0.83 ***	0.03	0.14	0.17	-0.48	-0.25	-0.09

CMJ: salto con contramovimiento; C1m·s<sup>-1</sup>: Velocidad con la carga de 1 m·s<sup>-1</sup>; Lac: lactatemia; T10: Tiempo en recorrer 10 m; T20: Tiempo en recorrer 20 m; TC: Tiempo de contacto; V5: Velocidad alcanzada a los 5 m; V10: Velocidad alcanzada a los 10 m; V15: Velocidad alcanzada a los 15 m; V20: Velocidad alcanzada a los 20 m; RMS: Root mean square; iEMG: Integración de la EMG; F<sub>med</sub>: Frecuencia mediana; F<sub>media</sub>: Frecuencia media; F<sub>max</sub>: Frecuencia máxima; ID: Índice de Dimitrov; TDW: Transformada discreta de wavelet en los dominios del 2 al 7.

**Tabla 30.** Relación entre los cambios en las variables mecánicas y metabólicas y los cambios en variables de EMG del músculo **Vasto lateral o Vasto externo.**

Variables	RMS	iEMG	F <sub>med</sub>	F <sub>media</sub>	F <sub>max</sub>	ID	TDW7	TDW6	TDW5	TDW4	TDW3	TDW2
CMJ	0.37	0.71 **	-0.71 **	-0.83 ***	-0.31	0.90 ***	0.42	0.65 **	0.68 **	0.79 ***	0.64 **	0.57 *
C1m·s <sup>-1</sup>	0.37	0.68 **	-0.78 ***	-0.89 ***	-0.40	0.93 ***	0.48	0.65 **	0.67 **	0.77 ***	0.69 **	0.58 *
Lac	0.29	0.72 **	-0.73 ***	-0.84 ***	-0.30	0.89 ***	0.41	0.54 *	0.59 *	0.71 **	0.56 *	0.48
T10	0.30	0.57 *	-0.62 **	-0.73 ***	-0.20	0.82 ***	0.55 *	0.67 **	0.71 **	0.69 **	0.69 **	0.60 *
T20	0.48	0.65 **	-0.73 ***	-0.83 ***	-0.28	0.88 ***	0.55 *	0.71 **	0.77 ***	0.78 ***	0.80 ***	0.71 **
TC	0.34	0.66 **	-0.65 **	-0.76 ***	-0.50 *	0.88 ***	0.32	0.56 *	0.74 ***	0.68 **	0.72 **	0.62 **
V5	-0.33	-0.41	0.70 **	0.84 ***	0.45	-0.84 ***	-0.49	-0.67 **	-0.72 **	-0.81 ***	-0.72 **	-0.63 **
V10	-0.59 *	-0.48	0.73 ***	0.75 **	0.41	-0.62 **	-0.30	-0.70 **	-0.67 **	-0.66 **	-0.75 ***	-0.65 **
V15	-0.66 **	-0.60 *	0.75 ***	0.82 ***	0.37	-0.80 ***	-0.48	-0.78 ***	-0.78 ***	-0.81 ***	-0.88 ***	-0.79 ***
V20	-0.48	-0.70 **	0.81 ***	0.88 ***	0.48	-0.86 ***	-0.38	-0.68 **	-0.63 **	-0.70 **	-0.71 **	-0.60 *

CMJ: salto con contramovimiento; C1m·s<sup>-1</sup>: Velocidad con la carga de 1 m·s<sup>-1</sup>; Lac: lactatemia; T10: Tiempo en recorrer 10 m; T20: Tiempo en recorrer 20 m; TC: Tiempo de contacto; V5: Velocidad alcanzada a los 5 m; V10: Velocidad alcanzada a los 10 m; V15: Velocidad alcanzada a los 15 m; V20: Velocidad alcanzada a los 20 m; RMS: Root mean square; iEMG: Integran de la EMG; F<sub>med</sub>: Frecuencia mediana; F<sub>media</sub>: Frecuencia media; F<sub>max</sub>: Frecuencia máxima; ID: Índice de Dimitrov; TDW: Transformada discreta de wavelet en los dominios del 2 al 7.





## 5.6. Discusión

Para nuestro conocimiento, este es el primer estudio en el que se analiza la respuesta mecánica, metabólica y neural ante 16 PEFs determinados por la velocidad de la primera repetición de la serie y la pérdida de velocidad dentro de cada serie de entrenamiento en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca. El principal hallazgo de este estudio fue que el *índice de esfuerzo* mostró una alta relación con el cambio en todas las variables mecánicas, metabólicas y de EMG analizadas para estimar el grado de fatiga producido por cada PEF. La alta validez mostrada por este nuevo índice como forma de expresión del *carácter del esfuerzo* (relación entre lo que se hace y lo que se podría hacer), nos permite avanzar en el conocimiento de la carga (esfuerzo) que se programa y, especialmente, de la carga que se ha generado en cada individuo una vez realizado el entrenamiento.

### 5.6.1. Características de los PEFs

El control de la velocidad de ejecución de cada repetición nos permitió ajustar el esfuerzo *realizado* al *programado* en cada sesión de entrenamiento y para cada participante con un alto grado de precisión ( $\pm 0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). En las **Tablas 22 y 23** se puede observar que tanto el promedio de la mejor repetición de la primera serie de entrenamiento como el promedio de pérdida de velocidad de las tres series de entrenamiento fue similar a las velocidades y pérdidas de velocidad programadas para cada PEF en ambos ejercicios evaluados (sentadilla completa y press de banca). Además, en estas tablas se puede apreciar también que el número de repeticiones necesario para alcanzar una determinada pérdida de velocidad en la serie fue menor a medida que incrementó la intensidad relativa. Esto se debe a que, a medida que incrementa la intensidad relativa, cada unidad de acción supone un mayor grado de esfuerzo (mayor pérdida de velocidad por repetición). Por este motivo, para alcanzar una pérdida de velocidad determinada se necesitan menos repeticiones cuando mayor es la intensidad relativa utilizada (ver **Estudio I.1** y **Estudio I.3**).

Conocer los factores mecánicos y fisiológicos subyacentes al entrenamiento de fuerza es fundamental para comprender los estímulos que producen las adaptaciones neuromusculares (Crewther, et al., 2005; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011).

Estos estímulos están determinados por la intensidad y el volumen utilizado durante el entrenamiento de fuerza (Bird, et al., 2005; González-Badillo & Ribas, 2002; Kraemer & Ratamess, 2004). Por tanto, es importante que estos dos factores estén claramente definidos para conocer el esfuerzo realizado. Sin embargo, en las investigaciones llevadas a cabo para analizar la respuesta mecánica y fisiológica después de una sesión de fuerza se han utilizado protocolos de entrenamiento basados en la realización de un número máximo de repeticiones posibles con una carga (kg) determinada (Ahtiainen, et al., 2003, 2004; González-Badillo et al., 2016; Gorostiaga et al., 2010; Kraemer et al., 1993; McCaulley et al., 2009; Pareja-Blanco et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Aunque estos estudios han permitido conocer algunos aspectos relevantes relacionado con el grado de fatiga generado por cada esfuerzo dependiendo: (1) del número de repeticiones máximas realizadas en la serie; (2) del número de repeticiones realizado en relación con las que se podían completar ante una carga determinada; y (3) de la pérdida de velocidad alcanzada durante el entrenamiento, es preciso recordar que esta forma de controlar la intensidad relativa y el volumen (mediante las XRM) son muy imprecisas (ver apartados **2. Origen de la problemática objeto de estudio** y **3.1. Componentes que definen la carga de entrenamiento**, y Estudio I). Así, es probable que en estos estudios cada individuo realizara los esfuerzos con una intensidad y volumen diferentes. Por tanto, el presente estudio constituye la primera aproximación al análisis de la fatiga neuromuscular producida por protocolos de esfuerzo en los que se controló de manera precisa la intensidad y el volumen realizado (a través de la velocidad de ejecución) en cada sesión para todos los participantes.

#### 5.6.2. Cambios en las variables mecánicas y metabólicas

En general, todas las variables mecánicas ( $C_{1m \cdot s^{-1}}$ , CMJ, T10, T20, TC, V5 m, V10 m, V15 m, V20 m) medidas para estimar el grado de fatiga generado por cada PEF mostraron un empeoramiento progresivo a medida que aumentó la pérdida de velocidad dentro de la serie ante la misma intensidad relativa (**Tablas 24 y 25; Figura 34**). La concentración sanguínea de lactato post-esfuerzo incremento progresivamente con la pérdida de velocidad en la serie. De acuerdo con estudios previos (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), estos resultados indican que, cuando se parte desde la misma velocidad inicial (misma

intensidad relativa), la pérdida de velocidad en la serie es lo que determina el grado de fatiga generado en dicha serie o sesión de entrenamiento. Además, nuestros resultados muestran también que para una misma pérdida de velocidad en la serie, el grado de fatiga producido es mayor cuanto menor es la intensidad relativa utilizada (**Tablas 24 y 25; Figura 34**). Estos resultados parecen indicar que el número de repeticiones que es necesario realizar para alcanzar una determinada pérdida de velocidad en la serie, lo cual depende de la intensidad relativa utilizada (**Tablas 22 y 23**), influye directamente en el grado de fatiga producido. Aunque no conocemos ningún estudio en el que se analice la fatiga aguda después de protocolos de esfuerzo definidos por la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad en la serie, otros estudios (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) en los que se analizó la pérdida de velocidad dentro de la serie durante esfuerzos programados en función del número de repeticiones realizado en relación con las que se podrían realizar han mostrado resultados similares a los encontrados en el presente estudio. Por ejemplo, Sánchez-Medina & González-Badillo (2011) mostraron que la pérdida de VMP dentro de la serie después de un esfuerzo consistente en 3x8(10) y 3x4(4) en el ejercicio de sentadilla completa fue semejante ( $32.3 \pm 5.5$  y  $32.0 \pm 5.1$ , respectivamente). Sin embargo, las pérdidas de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  (15.2% vs. 9.5%) y de altura de salto (13.6% vs. 10.6%), y la lactatemia post-esfuerzo (8.6 vs. 6.9  $mmol \cdot L^{-1}$ ) fueron mayores para el esfuerzo en el que se realizó un mayor número de repeticiones por serie [3x8(10)]. Del mismo modo, en una Tesis Doctoral presentada recientemente (Pareja-Blanco, 2016), también se observó que esfuerzos [3x6(12) vs. 3x3(6)] con la misma magnitud de pérdida de velocidad en la serie (26.1% vs. 26.2%) mostraron mayor pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  (13.7% vs. 5.4%), pérdida de altura de salto (22.3% vs. 20.3%), mayores concentraciones hormonales y mayor daño muscular cuanto mayor fue el número de repeticiones realizadas en la serie [i.e., 3x6(12)].

A pesar de que la capacidad de aceleración es muy importante para una gran cantidad de modalidades deportivas (Bangsbo, Norregaard, & Thorso, 1991; Caetano et al., 2015; Faude, Koch, & Meyer, 2012; McInnes, Carlson, Jones, & McKenna, 1995; Varley, Gabbett, & Aughey, 2014), no conocemos ningún estudio en el que se analicen los cambios agudos producidos por la realización de diferentes PEF sobre distintas variables mecánicas medidas durante un sprint. La mayoría de los estudios se han

centrado en analizar los cambios en el rendimiento en sprint después de diferentes protocolos de calentamiento (Gelen, 2010) o estiramiento (Turki et al., 2012). Sin embargo, dado que el entrenamiento de fuerza es un tipo de entrenamiento habitual en muchas modalidades deportivas, el cual se realiza antes de otros ejercicios específicos de campo, es importante conocer el grado de fatiga generado por dichas sesiones de entrenamiento de fuerza sobre la capacidad de realizar un sprint de 20 m. En este sentido, los resultados del presente estudio parecen indicar que para evitar descensos importantes en el rendimiento en sprint es importante no hacer sesiones de entrenamiento en las que las pérdidas de velocidad dentro de la serie sean superiores al 20%, independientemente de la intensidad relativa utilizada.

Otro aspecto importante en relación con el porcentaje de descenso del rendimiento en las variables medidas durante la carrera de 20 m es que éstos descensos fueron inferiores a los porcentajes de pérdida medidos en la VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  y la altura de CMJ. Esto se pudo deber principalmente a dos factores: (1) a que el tiempo de recuperación desde que se terminó la última repetición del PEF hasta que se hacen las mediciones post-esfuerzo fue mayor para la carrera de 20 m (3 min) que para el CMJ (10 s) o la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  (50 s); (2) a que el patrón de movimiento, el desplazamiento, la musculatura implicada y el tipo de activación muscular del ejercicio realizado durante el PEF (sentadilla completa) tiene mayor similitud con los ejercicios utilizados para medir la pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  (sentadilla completa) y la altura de salto (CMJ) que con la carrera (Franco-Marquez et al., 2015).

Por otro lado, para poder comparar la respuesta mecánica y metabólica ante diferentes esfuerzos entre los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, igualamos la intensidad relativa y el porcentaje de repeticiones realizado dentro de cada serie de entrenamiento para ambos ejercicios. Como hemos indicado en el apartado **5.4. Metodología**, para igualar el porcentaje de repeticiones realizado, el porcentaje de pérdida de velocidad dentro de la serie fue diferente para cada ejercicio, y estos fue establecido en base a los resultados obtenidos en el **Estudio I.3**. Este diseño constituye la aproximación más precisa para poder comparar la respuesta aguda ante diferentes esfuerzos en dos ejercicios diferentes. Nuestros resultados mostraron que la pérdida de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  fue mayor en el ejercicio de press de banca que en los de sentadilla completa, pero estas diferencias fueron estadísticamente significativas solo en aquellos esfuerzos en los que la pérdida de VMP dentro de la serie fue igual o superior al 30% y

40% en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente. Por el contrario, la concentración de lactato post-esfuerzo fue mayor para los PEFs realizados en el ejercicio de sentadilla completa. Resultados similares se han mostrados previamente en otros estudios en los que se analizó el grado de fatiga producido por protocolos de entrenamiento en los que se manipuló el número de repeticiones realizado en función del que se podía completar con una carga determinada (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), aunque dichos esfuerzos no fueran equivalentes en intensidad y volumen para ambos ejercicios. Conjuntamente, estos resultados parecen indicar que, los grupos musculares implicados en el ejercicio de press de banca experimentan un mayor grado de fatiga que los correspondientes en el ejercicio de sentadilla completa (mayor pérdida de fuerza y velocidad de acortamiento muscular). Además, es posible que la cantidad de lactato producido por  $\text{cm}^3$  de músculo sea mayor en grupos musculares más pequeños y con mayor proporción de fibras tipo II (Esbjornsson-Liljedahl, Sundberg, Norman, & Jansson, 1999), sin embargo, al tratarse de menores grupos musculares, la cantidad total de lactato ( $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ ) es menor a la producida por grupos musculares mayores.

### 5.6.3. Cambios en las variables de EMG

Los cambios en las variables de EMG fueron, en general, porcentualmente menores a los experimentados en las variables mecánicas y no mostraron una tendencia clara a aumentar sus valores de cambio a medida que incrementó el porcentaje de pérdida de velocidad dentro de la serie ante una misma intensidad (**Tablas 26 y 27**), excepto las variables  $F_{\text{med}}$ ,  $F_{\text{media}}$  y, principalmente, la variable ID, la cual mostró cambios importantes después de cada PEF tanto en el RF (11 - 60%) como en el VL (18 - 200%). Estos resultados están de acuerdo con estudios previos (Dimitrov, Arabadzhiev, Hogrel, & Dimitrova, 2008; Dimitrova, Hogrel, Arabadzhiev, & Dimitrov, 2005) en los que se compararon los cambios en los índices tradicionales (RMS, iEMG,  $F_{\text{med}}$ ,  $F_{\text{media}}$ ) y el nuevo índice espectral (ID) durante contracciones repetidas voluntarias e involuntarias del *bíceps braquial* y se observó que la sensibilidad del ID fue entre 50 y 150 veces mayor que la de otros índices tradicionales como la  $F_{\text{med}}$  y la  $F_{\text{media}}$ .

A pesar de que las señales de EMG registradas durante las activaciones dinámicas no son estacionarias, la mayoría de los estudios que han utilizado el registro de EMG para analizar la fatiga neuromuscular producida durante y después de la realización de un esfuerzo han analizado variables derivadas de la Transformada Rápida de Fourier (TRF) como la  $F_{med}$ , la  $F_{media}$  y la  $F_{max}$  (González-Izal, Malanda, Gorostiaga, & Izquierdo, 2012). En concordancia con nuestros resultados en los que se observa que el porcentaje de cambio fue mayor a medida que incrementó la pérdida de velocidad dentro de la serie ante la misma intensidad relativa (principalmente en el músculo VL), se ha observado un descenso en la  $F_{med}$  y la  $F_{media}$  a medida que incrementa el número de repeticiones realizadas dentro de una serie (mayor pérdida de velocidad) (González-Izal et al., 2010a; González-Izal et al., 2010b; Gorostiaga et al., 2012) y después de un protocolo de fatiga (Izquierdo et al., 2009; Penailillo, Silvestre, & Nosaka, 2013). De hecho, aunque algunos estudios han indicado que estas variables tienen una sensibilidad relativamente baja para identificar las pérdida de fuerza y potencia muscular (Chesler & Durfee, 1997; Mizrahi, Levin, Aviram, Isakov, & Susak, 1997; Vollestad, 1997), un cambio en el espectro de potencia de EMG hacia frecuencias más bajas (i.e., un descenso de la  $F_{med}$ , la  $F_{media}$  y la  $F_{max}$ ) se ha identificado con el desarrollo de fatiga muscular (Chowdhury & Nimbarte, 2015; Dimitrov et al., 2006; Gerdle, Karlsson, Crenshaw, Elert, & Friden, 2000a; Gerdle, Larsson, & Karlsson, 2000b; González-Izal, et al., 2012).

La amplitud de la EMG, ya sea medida a través de la RMS o la iEMG, también ha sido ampliamente utilizada para analizar los cambios en la actividad eléctrica muscular y su relación con la fatiga (González-Izal, et al., 2012; Shair, Ahmad, Marhaban, Mohd Tamrin, & Abdullah, 2017). Contrario a los datos mostrados en el presente estudio, la mayoría de los trabajos encontraron que la RMS y la iEMG aumentan progresivamente a medida que aumenta el número de repeticiones realizadas dentro de una serie hasta llegar a un punto en el que los valores de ambas variables se estabilizan (meseta) a pesar de que el número de repeticiones aumente (Arendt-Nielsen & Mills, 1988; Gerdle, et al., 2000a; Smith et al., 2016). Del mismo modo, aquellos estudios que analizaron los cambios en la amplitud de la EMG antes y después de un protocolo de esfuerzo también han mostrado incrementos en los valores de RMS, iEMG o el promedio del voltaje de la EMG (González-Izal, et al., 2010a; González-Izal, et al., 2010b; Penailillo, et al., 2013). Sin embargo, al igual que los resultados encontrados en el presente estudio, otros

trabajos también han encontrado que la RMS y el promedio del voltaje de la EMG se mantienen prácticamente estables (Gerdle, et al., 2000a; Gorostiaga, et al., 2012) o disminuyen (Komi & Tesch, 1979; Moritani, Muro, & Nagata, 1986) durante o después de diferentes protocolos de esfuerzo.

El índice espectral  $F_{Insm}$  de orden 5 (también llamado índice de Dimitrov) mostró un aumento significativo después de cada PEF (**Tablas 26 y 27**). Estos incrementos fueron mayores a medida que aumentó el porcentaje de pérdida de velocidad dentro de la serie. Además, la magnitud de cambio en esta variable fue mayor en el músculo VL que en el RF, lo cual parece indicar que este músculo puede ser más sensible para detectar fatiga neuromuscular durante el ejercicio de sentadilla completa. La mayoría de los estudios que han utilizado este parámetro para el análisis de fatiga neuromuscular han analizado los cambios durante la realización del esfuerzo (Dimitrov, et al., 2006; González-Izal, et al., 2010a; González-Izal, et al., 2010b; Gorostiaga, et al., 2012). En estos estudios se observó que el ID aumentó progresivamente con el número de repeticiones realizadas dentro de la serie y estos cambios fueron de mayor magnitud que los de otras variables como la  $F_{media}$  o el voltaje medio de la EMG (Dimitrov, et al., 2006; González-Izal, et al., 2010a; González-Izal, et al., 2010b; Gorostiaga, et al., 2012). Solo conocemos un trabajo en el que se estudiaron los cambios en la ID después de diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza (Izquierdo, et al., 2009) en el cual se encontró que, para un mismo número de repeticiones en la serie (10 repeticiones) el esfuerzo que se realizó con una mayor carga absoluta fue el que produjo el mayor incremento post-esfuerzo en el ID (Izquierdo, et al., 2009). Por tanto, independientemente de si se analizaron los cambios durante o después de las sesiones de entrenamiento, los resultados de estas investigaciones coinciden con los mostrados en el presente estudio e indican que este índice espectral basado en el análisis no estacionario de la señal de EMG permite medir de manera fiable y con mayor sensibilidad la fatiga muscular periférica durante activaciones dinámicas concéntricas que otros índices de EMG (Dimitrov, et al., 2006; González-Izal, et al., 2012; González-Izal, et al., 2010a; González-Izal, et al., 2010b).

Por último, los valores de TDW en todos los dominios aumentaron después de todos los protocolos de esfuerzo, pero estos cambios fueron mayores en las bandas de frecuencias más bajas (dominios: 4 a 7; frecuencias correspondientes: desde 31.2 - 32.5 a 3.9 - 7.8 Hz). La TDW se ha utilizado para estudiar señales no estacionarias de EMG con el fin de evaluar la fatiga neuromuscular durante y después de una gran variedad de acciones

(Beck et al., 2005; Chowdhury & Nimbarte, 2015; Chowdhury, Nimbarte, Jaridi, & Creese, 2013; González-Izal, et al., 2010b; Hostens, Seghers, Spaepen, & Ramon, 2004; Kumar, Pah, & Bradley, 2003; Penailillo, et al., 2013; So, Ng, Lam, Lo, & Ng, 2009). En aquellos estudios en los que se evaluó la TDW durante la realización de un esfuerzo se observó un incremento de los valores en todos los dominios analizados, independientemente del rango de frecuencias utilizados en cada caso, aunque, similar a los resultados de nuestro estudio, esos cambios mostraron una tendencia a ser mayores en las bandas de frecuencias más bajas (Chowdhury & Nimbarte, 2015; Chowdhury, et al., 2013; González-Izal, et al., 2010b; So, et al., 2009). Del mismo modo, en otro estudio (Penailillo, et al., 2013) en el que se analizaron los cambios en los mismos 7 dominios que los utilizados en el presente estudio después de un test de wingate de 30 s también se encontraron cambios en todos los dominios, siendo estos mayores en los dominios 3 (62.5 - 125 Hz), 4 (31.2 - 62.5 Hz) y 5 (15.6 - 31.2 Hz). Aunque los cambios se dieron en similares bandas de frecuencias que en nuestro estudio, los incrementos (%) mostrados en el trabajo de Peñailillo et al. (2013) fueron superiores a los encontrados por nosotros. Es posible que diferentes aspectos metodológicos como el tipo de esfuerzo realizado para generar fatiga (sentadilla completa vs. test de wingate), tipo de activación muscular realizada para medir el registro de EMG (concéntrica vs. isométrica) y tiempo tomado para evaluar la señal de EMG (0.5 vs. 2 s) pueden estar influyendo directamente en los resultados obtenidos en uno y otro estudio.

Por tanto, de acuerdo con estudios previos, los esfuerzos analizados en el presente estudio generaron fatiga neuromuscular, observable principalmente por el cambio por la potencia del espectro de EMG hacia frecuencias más bajas, por el incremento en la magnitud del índice de fatiga espectral analizado (ID) y por el aumento de la intensidad en los dominios de baja frecuencia de la TDW. Los descensos en la  $F_{med}$  y la  $F_{media}$  podrían deberse a un aumento de las unidades motoras activadas durante la contracción y/o al incremento de unidades motoras sincronizadas, presumiblemente para compensar la fatiga muscular acumulada (González-Izal, et al., 2012; González-Izal, et al., 2010a; González-Izal, et al., 2010b; Masuda, Masuda, Sadoyama, Inaki, & Katsuta, 1999; Tesch, Dudley, Duvoisin, Hather, & Harris, 1990). Los incrementos del ID se han asociado parcialmente con un aumento en la duración de la onda de potencial de acción de la unidad motora y una subsiguiente disminución en la velocidad de conducción de las fibras musculares (Bigland-Ritchie, Donovan, & Roussos, 1981). Por último, se ha



especulado que los cambios en los dominios de baja frecuencia obtenidos a través de la TDW pueden ser debidos a un descenso en la tasa de disparo y la velocidad de conducción neural de las fibras musculares de contracción rápidas (González-Izal, et al., 2012; So, et al., 2009).

#### **5.6.4. Relaciones entre el índice de esfuerzo y las variables mecánicas, metabólicas y de EMG**

La principal fortaleza de este estudio fue el hallazgo de un *índice de esfuerzo* (definido por el producto de la velocidad de la mejor repetición de la primera serie y la pérdida de velocidad en la serie) que nos permite conocer el grado de esfuerzo real que supone la realización de un determinado entrenamiento para cada individuo. Esta validez para estimar el grado de esfuerzo viene dada por las altas relaciones encontradas entre dicho *índice de esfuerzo* y los cambios en las diferentes variables mecánicas, metabólicas y de EMG usadas para estimar el grado de fatiga producido por cada PEF.

#### ***Relaciones entre el índice de esfuerzo y los cambios en las variables mecánicas***

En esencia, todos los modelos de fatiga tienen dos componentes fundamentales: la fatiga inducida y la fatiga cuantificada (Allen, et al., 2008; Cairns, et al., 2005; Enoka & Duchateau, 2008; MacIntosh & Rassier, 2002; Maffiuletti & Bendahan, 2009). La fatiga inducida solo la podemos estimar a través de la fatiga cuantificada, y por tanto, la validez del índice que mide o estima la fatiga inducida solo es posible si encontramos relaciones entre éste y la fatiga cuantificada. En nuestro estudio, la fatiga se cuantificó a través de los cambios pre-post esfuerzo en la VMP ante una misma carga absoluta (para los PEFs realizados en sentadilla completa y press de banca), y la altura de salto vertical y la velocidad en una carrera de 20 m (solo para los PEFs en sentadilla completa). El IE (índice propuesto para estimar la fatiga inducida) mostró una alta relación con la pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  tanto en los PEFs realizados en sentadilla completa ( $r = 0.92$ ; **Figuras 35A**) como en press de banca ( $r = 0.98$ ; **Figuras 36A**), con la pérdida de CMJ ( $r = 0.93$ ; **Figura 35B**) y los cambios en las distintas variables mecánicas evaluadas durante el test de carrera en 20 m ( $r = 0.67 - 0.84$ ; **Figura 37**). Estas relaciones indican que ante un mismo IE, el grado de fatiga producido es equivalente,

independientemente de cuál fue la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad en la serie. Como ejemplo, se puede observar que, en el ejercicio de sentadilla completa, los PEFs 2 ( $VMP_{\text{mejor}}$ :  $\sim 1.14$ ; PV:  $\sim 20\%$ ) y 11 ( $VMP_{\text{mejor}}$ :  $\sim 0.83$ ; PV:  $\sim 30\%$ ) produjeron IE similares (22.8 vs. 24.8, respectivamente) y las pérdidas de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  fueron prácticamente las mismas (16.0 vs. 16.5%, respectivamente). Estos resultados suponen un avance considerable para el control y la dosificación del entrenamiento de fuerza con respecto a estudios previos (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) en los que se indicaba que el grado de fatiga estaba determinado solo por la pérdida de velocidad en la serie. Sin embargo, como se ha observado en el presente estudio, la velocidad de la primera repetición de la serie, y como consecuencia el número de repeticiones necesario para alcanzar una determinada pérdida de velocidad en la serie, también influye de manera directa en el grado de fatiga generado durante el entrenamiento y por tanto, debía ser considerada para calcular el grado de esfuerzo inducido.

Por tanto, mediante la medición de la velocidad de ejecución durante el entrenamiento de fuerza y el control de las mencionadas variables (VMP de la primera repetición y pérdida de VMP dentro de la serie) se puede obtener un referente notablemente preciso (*índice de esfuerzo*) para la programación del entrenamiento, el cual mejora cualquier otro procedimiento empleado hasta la fecha.

De las correlaciones observadas entre el IE y las variables mecánicas analizadas, es importante destacar dos cuestiones. Por una parte, se puede observar cómo las correlaciones entre el IE y la pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  son superiores en el ejercicio de press de banca (**Figura 36A**) que en el de sentadilla completa (**Figura 35A**), lo cual puede venir explicado por la mayor estabilidad de la medida en este ejercicio (menor rango de movimiento, pausa entre fase excéntrica y concéntrica del movimiento, menores grupos musculares y articulaciones implicadas) en comparación con el ejercicio de sentadilla completa. Por otro lado, en los PEF realizados en el ejercicio de sentadilla completa, el IE mostró una mayor relación con los cambios en la VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y el CMJ (**Figura 35**) que con los cambios en las variables mecánicas obtenidas durante la carrera de 20 m (**Figura 37**). Estos resultados, junto con el menor porcentaje de cambio experimentado por las variables medidas durante el test de carrera en 20 m después de cada PEF en comparación con los cambios en la VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y la

altura de salto, parecen indicar que estas dos variables tienen mayor sensibilidad y precisión para estimar el grado de fatiga producido, al menos en protocolos de esfuerzo realizados en el ejercicio de sentadilla completa.

### **Relaciones entre el índice de esfuerzo y los cambios en las variables metabólicas y de EMG**

Una vez ratificada la validez del IE como indicador de fatiga por las altas correlaciones encontradas entre esta variable y las pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y la altura de salto, es posible usar el IE para validar otras medidas de fatiga neuromuscular. En el presente estudio, además de analizar los cambios en diferentes variables mecánicas, se midieron los cambios pre-post esfuerzo en la concentración sanguínea de lactato y en variables de EMG. El IE mostró una estrecha relación lineal con la lactatemia post-esfuerzo en los PEFs realizados en el ejercicio de sentadilla completa (**Figura 35C**) y press de banca (**Figura 36B**). Además, también se encontraron relaciones significativas entre el IE y los cambios en las variables RMS (RF)  $F_{med}$  (RF y VL),  $F_{media}$  (RF y VL), ID (RF y VL), y la TDW en los dominio 2, 3, 4, 5 y 6 (VL) (**Tabla 28**). Por tanto, es razonable admitir que los valores del IE son buenos estimadores del grado de concentración de lactato post-esfuerzo y los cambios en las variables de EMG citadas anteriormente y, por tanto, en el caso de que se necesitara hacer una estimación de estas variables, se podrían predecir partiendo del IE sin necesidad de medirlas.

### **Relaciones entre los cambios en las variables mecánicas, metabólicas y de EMG**

Las altas correlaciones encontradas entre los cambios en las distintas variables mecánicas (VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y CMJ) medidas antes y después de cada PEF refuerzan la validez del IE como variable para controlar y cuantificar el grado de fatiga durante el entrenamiento de fuerza. En estudios previos en los que se analizó el grado de fatiga producido por diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza definidos por el número de repeticiones realizadas en relación a las repeticiones realizables en los ejercicios de sentadilla y press de banca (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) también se observaron altos coeficientes de correlación entre los cambios en VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$ , la

pérdida de CMJ y la concentración sanguínea de lactato post-esfuerzo. Al igual que en esos estudios, la homogeneidad en las pérdidas de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  y CMJ sugiere que estas dos variables reflejan de manera semejante y precisa la fatiga neuromuscular producida por diferentes estímulos o grados de esfuerzo (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), por lo que una variable, como el IE en este caso, que presente una alta relación con dichas variables, se puede considerar como un buen estimador del grado de fatiga.

Las relaciones entre IE y variables de la carrera y de EMG vienen confirmadas por las relaciones encontradas entre las pérdidas de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  y altura de salto con las variables medidas durante el test de carrera en 20 m y la EMG. Estos resultados ratifican nuestra hipótesis sobre el uso de la variable IE para estimar el grado de fatiga neuromuscular. Aunque los coeficientes de correlación mostrados entre las pérdidas de VMP con la  $C_{1m \cdot s^{-1}}$  y CMJ con los cambios en T10 ( $r = 0.85$  y  $r = 0.78$ , respectivamente), T20 ( $r = 0.85$  y  $r = 0.80$ , respectivamente), TC ( $r = 0.84$  y  $r = 0.77$ , respectivamente), V5 m ( $r = 0.85$  y  $r = 0.84$ , respectivamente), V10 m ( $r = 0.65$  y  $r = 0.57$ , respectivamente), V15 m ( $r = 0.75$  y  $r = 0.73$ , respectivamente) y V20 m ( $r = 0.91$  y  $r = 0.86$ , respectivamente), no fueron tan altos como los mostrados entre ellos ( $r = 0.96$ ), si fueron suficientemente elevados como para sugerir que el grado de fatiga inducido durante una sesión de entrenamiento de fuerza se puede estimar a través de los cambios en estas variables.

En cuanto a las variables de EMG, son varios los estudios en los que se ha mostrado relaciones lineales significativas entre el descenso de fuerza, velocidad o potencia durante cada repetición de una serie realizada hasta el fallo muscular y los cambios en algunas variables de EMG como la RMS, el ID,  $F_{med}$ , la  $F_{media}$  o la TDW (Chowdhury & Nimbarte, 2015; Dimitrov, et al., 2006; Gerdle, et al., 2000b; González-Izal, et al., 2012; González-Izal, et al., 2010a; González-Izal, et al., 2010b; Gorostiaga, et al., 2012; Smith, et al., 2016), lo cual indica que estas variables de EMG tienen habilidad para estimar la fatiga generada durante series de repeticiones dinámicas. Sin embargo, para nuestro conocimiento, este es el primer estudio en el que se analiza la relación entre las pérdidas en la VMP ante una misma carga absoluta y la altura de salto y los cambios en variables de EMG después de 16 PEFs definidos por la velocidad de la primera repetición de la serie y la pérdida de velocidad en la serie. En base al valor de las correlaciones encontradas (**Tablas 29 y 30**), los resultados de nuestro estudio permiten

confirmar que las variables  $F_{med}$ ,  $F_{media}$ , ID y los cambios en el espectro de baja frecuencia de la EMG (dominios 3, 4 y 5 de la TDW) son las que mejor expresan (y por tanto, las que más validez tienen) el grado de esfuerzo que supone un determinado protocolo de entrenamiento.

#### 5.6.5. Uso del índice de esfuerzo para la programar el entrenamiento de fuerza

Para poder llevar a cabo la aplicación del IE como lo hemos definido, es necesario tener disponible información sobre el grado de esfuerzo que significa una determinada pérdida de velocidad en la serie ante cualquier intensidad relativa. Esto es así porque, como hemos indicado, la programación del entrenamiento y el control de la ejecución del mismo se debería llevar a cabo en función de dos variables: 1) la velocidad de la primera repetición, la cual indica cuál es el porcentaje de 1RM con el que se entrena (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010), y 2) la pérdida de velocidad en la serie (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), como complemento del grado de esfuerzo generado. Los resultados del presente estudio permiten que actualmente ya tengamos la oportunidad de decidir la elección de la velocidad de la primera repetición y la elección de la pérdida de velocidad en función del grado de esfuerzo que queremos programar.

En las **Tablas 31 y 32** se presentan los valores del IE correspondientes a distintas magnitudes de pérdida de velocidad alcanzadas ante distintas intensidades relativas, estimadas éstas siempre a través de la velocidad de la primera repetición de la serie, en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente.

**Tabla 31.** Índice o grado de esfuerzo (IE) correspondiente a distintos porcentajes de pérdida de velocidad en la sesión de entrenamiento, desde el 10 al 55%, ante distintas intensidades relativas (40-95% 1RM) determinadas por la velocidad de la primera repetición, en el ejercicio de **sentadilla completa**.

Intensidad relativa [% 1RM (VMP)]	Pérdida de VMP en la serie (%)									
	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%
40% (~1.28 m·s <sup>-1</sup> )	12.8	19.2	25.5	31.8	38.1	44.5	50.8	57.1	63.5	69.8
45% (~1.20 m·s <sup>-1</sup> )	12.1	18.1	24.1	30.0	36.0	42.0	47.9	53.9	59.9	65.9
50% (~1.13 m·s <sup>-1</sup> )	11.4	17.0	22.6	28.3	33.9	39.5	45.1	50.7	56.3	61.9
55% (~1.06 m·s <sup>-1</sup> )	10.7	15.9	21.2	26.5	31.7	37.0	42.2	47.5	52.8	58.0
60% (~0.98 m·s <sup>-1</sup> )	10.0	14.9	19.8	24.7	29.6	34.5	39.4	44.3	49.2	54.1
65% (~0.90 m·s <sup>-1</sup> )	9.3	13.8	18.4	22.9	27.4	32.0	36.5	41.1	45.6	50.2
70% (~0.83 m·s <sup>-1</sup> )	8.5	12.7	16.9	21.1	25.3	29.5	33.7	37.9	42.1	46.3
75% (~0.75 m·s <sup>-1</sup> )	7.8	11.7	15.5	19.3	23.2	27.0	30.8	34.7	38.5	42.4
80% (~0.68 m·s <sup>-1</sup> )	7.1	10.6	14.1	17.5	21.0	24.5	28.0	31.5	35.0	38.4
85% (~0.60 m·s <sup>-1</sup> )	6.4	9.5	12.6	15.8	18.9	22.0	25.1	28.3	31.4	34.5
90% (~0.52 m·s <sup>-1</sup> )	5.7	8.4	11.2	14.0	16.7	19.5	22.3	25.1	27.8	30.6
95% (~0.44 m·s <sup>-1</sup> )	4.9	7.4	9.8	12.2	14.6	17.0	19.4	21.9	24.3	26.7

VMP: Velocidad media propulsiva; 1RM: Una repetición máxima

**Tabla 32.** Índice o grado de esfuerzo (IE) correspondiente a distintos porcentajes de pérdida de velocidad en la sesión de entrenamiento, desde el 10 al 60%, ante distintas intensidades relativas (40-95% 1RM) determinadas por la velocidad de la primera repetición, en el ejercicio de **press de banca**.

Intensidad relativa [% 1RM (VMP)]	Pérdida de VMP en la serie (%)										
	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%
40% (~1.13 m·s <sup>-1</sup> )	10.9	16.3	21.7	27.0	32.4	37.4	43.2	48.6	54.0	59.3	64.7
45% (~1.04 m·s <sup>-1</sup> )	10.1	15.2	20.2	25.2	30.2	34.8	40.2	45.3	50.3	55.3	60.3
50% (~0.93 m·s <sup>-1</sup> )	9.4	14.0	18.7	23.3	28.0	32.1	37.3	41.9	46.6	51.2	55.9
55% (~0.86 m·s <sup>-1</sup> )	8.6	12.9	17.2	21.5	25.8	29.5	34.3	38.6	42.9	47.2	51.5
60% (~0.79 m·s <sup>-1</sup> )	7.9	11.8	15.7	19.6	23.5	26.9	31.4	35.3	39.2	43.1	47.0
65% (~0.70 m·s <sup>-1</sup> )	7.1	10.7	14.2	17.8	21.3	24.2	28.4	32.0	35.5	39.1	42.6
70% (~0.62 m·s <sup>-1</sup> )	6.4	9.6	12.7	15.9	19.1	21.6	25.5	28.6	31.8	35.0	38.2
75% (~0.54 m·s <sup>-1</sup> )	5.6	8.4	11.3	14.1	16.9	19.0	22.5	25.3	28.1	31.0	33.8
80% (~0.47 m·s <sup>-1</sup> )	4.9	7.3	9.8	12.2	14.7	16.3	19.6	22.0	24.5	26.9	29.4
85% (~0.39 m·s <sup>-1</sup> )	4.1	6.2	8.3	10.4	12.4	13.7	16.6	18.7	20.8	22.9	24.9
90% (~0.31 m·s <sup>-1</sup> )	3.4	5.1	6.8	8.5	10.2	11.0	13.7	15.4	17.1	18.8	20.5
95% (~0.24 m·s <sup>-1</sup> )	2.6	4.0	5.3	6.7	8.0	8.4	10.7	12.0	13.4	14.7	16.1

VMP: Velocidad media propulsiva; 1RM: Una repetición máxima

Para elaborar esta información hemos partido de la relación encontrada entre el *índice de esfuerzo* y la pérdida de velocidad alcanzada en la serie con cada uno de los porcentajes de la RM. Los valores de las correlaciones para predecir el índice correspondiente a cada pérdida de velocidad no ha sido nunca menor de  $r = 0.99$ .

Una prueba del ajuste de estos datos a la realidad es la alta semejanza entre los valores del IE predichos en las **Tablas 31 y 32** y los valores directos observados en el estudio. Por ejemplo, para los PEFs realizados en el ejercicio de **press de banca**, para las pérdidas de velocidad extremas del presente estudio, el 15 y el 55%, los valores directos comparados con los predichos fueron los siguientes. En cuanto a la **pérdida del 15%**, con el 50% 1RM el valor directo del IE fue 14.0 (para un 15.1% de pérdida media de velocidad real), frente al 14.0 predicho; con el 60% 1RM (15.5% real) fueron 12.3 frente a 11.8; con el 70% 1RM (15.2% real) 9.8 frente a 9.6 y con el 80% 1RM (15.3% real) 7.4 frente a 7.3. Para la **pérdida del 55%**, con el 50% 1RM (54.9% de pérdida real) los valores del IE fueron 50.9 frente a 51.2; con el 60% 1RM (55.1% real) 43.7 frente a 43.1; con el 70% 1RM (54.1% real) 34.1 frente a 35.0, y con el 80% 1RM (56.8% real) 27.8 frente a 26.9. Para el ejercicio de sentadilla los ajustes son semejantes.

Se puede observar que las diferencias son sólo de unas décimas en los casos más distantes, y que estas diferencias vienen en parte justificadas porque, en la práctica, la pérdida real al hacer el entrenamiento no puede ser exactamente igual a la programada. Así, por ejemplo, con el 80% 1RM se programó una pérdida del 55%, pero realmente la pérdida media alcanzada fue del 56.8%. Esto marca la tendencia a que en lugar de significar la sesión un IE del 26.9 predicho, sea algo mayor, el 27.8. Si se observa el conjunto de datos que hemos aportado, se podrá comprobar este tipo de tendencia en los demás casos.

Por tanto, parece que tomar como referencia estos valores del *índice de esfuerzo* para estimar el *carácter del esfuerzo* que ha supuesto para cada individuo el entrenamiento puede ser útil para la programación y valoración del grado de esfuerzo realizado. Se debe recordar aquí que el IE presenta una relación de 0.98 (press de banca) y 0.91 (sentadilla) con la pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$ , que sería en definitiva la referencia final que determine la fatiga generada por el entrenamiento.

A partir de los datos expuestos en las **Tablas 31 y 32** se puede comprobar también cómo para alcanzar un índice de esfuerzo semejante, la pérdida de velocidad en la serie ha de ser distinta según la intensidad relativa utilizada (no se debe olvidar que las intensidades relativas deben estimarse por la velocidad de la primera repetición o velocidad máxima en la primera serie). Por ejemplo, para un IE de aproximadamente 14.0, con el 50% 1RM se ha de perder un ~15% de velocidad en la sesión, y por ejemplo, para el 65, 75, 80, 85 y 90% 1RM un ~20, 25, 30, 35 y 40%, respectivamente.



## 5.7. Conclusiones

Las principales conclusiones del **Estudio II** fueron las siguientes:

- Los cambios en las variables mecánicas, metabólicas y de EMG analizadas en el presente estudio fueron mayores a medida que incrementó el porcentaje de pérdida de velocidad en la serie ante la misma intensidad relativa (% 1RM).
- Para una misma pérdida de velocidad en la serie, cuanto menor fue la intensidad relativa utilizada mayor fue el grado de fatiga cuantificado.
- Ante un mismo *índice de esfuerzo*, el grado de fatiga producido es equivalente, independientemente de cuál sea la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad en la serie, al menos cuando la velocidad de la primera repetición oscilar entre  $\sim 1.13 - 0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  en sentadilla completa y  $\sim 0.93 - 0.47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  en press de banca, y las pérdidas de velocidad en la serie fluctúan entre  $\sim 10 - 45\%$  en sentadilla completa y  $\sim 15 - 55\%$  en press de banca.
- El *índice de esfuerzo* mostró una alta validez como expresión del carácter del esfuerzo, lo cual nos permite avanzar en el conocimiento de la carga (*esfuerzo*) que se programa y, especialmente, de la carga que se ha generado en cada individuo una vez realizado el entrenamiento.
- Las pérdidas de VMP con la  $C1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  y de altura de salto vertical (CMJ) reflejan de manera semejante y precisa la fatiga neuromuscular producida por diferentes estímulos o grados de esfuerzo, en un amplio rango de intensidades (50 - 80% 1RM) y de pérdida de velocidad dentro de la serie (10 - 45% y 15 - 55% para los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente).
- Las pérdidas de VMP con la  $C1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  y de altura de salto vertical (CMJ) fueron superiores y mostraron una mayor correlación con el *índice de esfuerzo* que los cambios en las variables mecánicas medidas durante el test de carrera en 20 m.

- La concentración sanguínea de lactato post-esfuerzo presentó una alta relación lineal con el *índice de esfuerzo*, y una elevada correlación con todos los tipos de pérdidas mecánicas analizadas, tanto en el ejercicio de sentadilla completa como en el de press de banca. Por tanto, el índice de esfuerzo y las pérdidas mecánicas analizadas (pérdida de velocidad con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y de altura de salto vertical) son precisos predictores del estrés metabólico generado cuando este se estima a través de la concentración de lactato post ejercicio.
- Los cambios en las variables  $F_{med}$ ,  $F_{media}$ , ID y TDW en los dominios 3, 4 y 5 derivadas del registro de EMG en los músculos RF y VL presentaron una relación moderada-alta con el *índice de esfuerzo*, la concentración sanguínea de lactato post-esfuerzo y con los cambios en otras variables mecánicas. Por tanto, el *índice de esfuerzo* puede considerarse un buen indicador para estimar la fatiga neuromuscular producida durante el entrenamiento de fuerza.

## 5.8. Aplicaciones Prácticas

Las principales aplicaciones prácticas que se derivan de los resultados mostrados en el **Estudio II** son las siguientes:

Las altas correlaciones encontradas entre el *índice de esfuerzo* y los cambios en las variables mecánicas, indicadoras de la fatiga, indican que si se quiere generar un determinado grado de esfuerzo, debería programarse el entrenamiento (la *carga*) tomando como referencia la velocidad de la primera repetición en la serie y la pérdida de velocidad dentro de la serie.

El *carácter del esfuerzo* cuantificado por medio del *índice de esfuerzo* propuesto es necesario y determinante como variable de control y tiene una función importante como variable independiente, de tal manera que podría proporcionar información sobre el efecto que puede tener cada intensidad relativa, y otras variables que constituyen la *carga* de entrenamiento, en función del *índice de esfuerzo* generado.

Además de la aplicación fundamental como variable de control y como variable independiente, la cuantificación del *índice de esfuerzo* permite un mejor análisis de los efectos de cualquier diseño de entrenamiento, pudiendo comprobar la relación entre el *índice de esfuerzo* y los efectos producidos, aparte de otras variables con menor poder de discriminación como las series, el número de repeticiones por serie e incluso las intensidades relativas, ya que un mismo valor de estas últimas variables puede significar un grado de esfuerzo muy distinto en función de cuáles son los valores de las demás.

Dado que, para nuestro conocimiento, el *índice de esfuerzo* es el precursor más preciso del grado de fatiga inducido durante el entrenamiento de fuerza, si quisiéramos comparar el efecto de distintos rangos de intensidad relativas (% 1RM) sobre los cambios en fuerza o en otros tipos de rendimiento, habría que asegurar que el *índice de esfuerzo* fuera equivalente para los distintos programas de entrenamiento, y para ello sería necesario que las pérdidas de velocidad en la serie o sesión fueran distintas para cada intensidad relativa utilizada en los distintos programas de entrenamiento, de forma que los esfuerzos realizados fueran semejantes. Sólo si esto se realiza de esta manera, se podría aceptar que la variable independiente del estudio es verdaderamente la intensidad relativa. Por tanto, afirmar que el entrenamiento con una intensidad o rango de

intensidades es mejor o peor que con otra, no es pertinente si no se ha controlado el *carácter del esfuerzo* que se ha generado con las distintas intensidades.

Dada la mayor sensibilidad y relación con el *índice de esfuerzo* de la lactatemia post-esfuerzo y las pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y de altura de salto en comparación con los cambios en las variables medidas durante el test de carrera en 20 m y los cambios en las variables de EMG, es preferible utilizar las pérdidas pre-post esfuerzo en estas dos variables (VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y CMJ) para estimar el grado de fatiga inducido por el entrenamiento de fuerza.

En el presente estudio se han analizado distintas variables derivadas del registro de EMG relacionadas con la fatiga neuromuscular. La mayoría de ellas mostró una relación moderada-alta con el *índice de esfuerzo*. Por tanto, el índice propuesto también puede ser un indicador válido de la fatiga neural inducida durante el entrenamiento de fuerza.

## **6. Estudio III:**

***Efecto de la pérdida de velocidad en la serie durante el entrenamiento de fuerza con distintas intensidades sobre la fuerza aplicada, el rendimiento físico, la respuesta hormonal y los cambios neurales***





## 6. Estudio III: Efecto de la pérdida de velocidad en la serie durante el entrenamiento de fuerza con distintas intensidades sobre la fuerza aplicada, el rendimiento físico, la respuesta hormonal y los cambios neurales

### 6.1. Planteamiento del Problema y Propósito de la Investigación

La configuración del entrenamiento de fuerza viene determinada principalmente por la manipulación de la intensidad y el volumen (Bird, et al., 2005; González-Badillo & Ribas, 2002; Kraemer & Ratamess, 2004). Tradicionalmente, la intensidad ha sido determinada a través de la 1RM o XRM. Sin embargo, estos procedimientos están asociados a una gran cantidad de inconvenientes, los cuales han sido ampliamente expuestos en los apartados **2. Origen de la problemática objeto de estudio** y **3. Estado actual del conocimiento**. Para intentar solucionar esta problemática asociada con la determinación de la intensidad durante el entrenamiento de fuerza, se ha encontrado en varios estudios (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2017) que existe una estrecha relación entre la velocidad de movimiento y el porcentaje de 1RM, de tal manera que se puede saber el porcentaje real de 1RM que representa una carga (kg) determinada tan pronto como se haga una repetición a la máxima velocidad posible.

En cuanto al volumen de entrenamiento, este se ha definido y programado a través del número de repeticiones por serie. Sin embargo, como se ha mostrado en el **Estudio I** de la presente Tesis Doctoral y en otros estudios previos (Sakamoto & Sinclair, 2006; Shimano et al., 2006; Terzis, et al., 2008), la amplia variabilidad entre-sujetos en el número de repeticiones que se pueden realizar ante una misma intensidad relativa sugieren que, para un mismo número de repeticiones, es probable que el grado de esfuerzo experimentado por cada individuo sea distinto. En estudios más recientes (González-Badillo et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) se ha podido comprobar que la pérdida de velocidad en la serie es una variable que se puede utilizar para cuantificar objetivamente el grado de fatiga producido durante una serie. Además, en el **Estudio I** de la presente

Tesis Doctoral hemos encontrado que la pérdida de velocidad en la serie muestra una fuerte relación con el porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo número de repeticiones que se pueden completar con una carga determinada. Conjuntamente, estos resultados sugieren que, en vez de programar un número de repeticiones concreto a realizar en cada serie de entrenamiento para todos los individuos, para igualar el grado de esfuerzo inducido en cada sesión de entrenamiento en todos los participantes, el volumen de entrenamiento debería venir determinado por la pérdida de velocidad en la serie (es decir, el volumen de repeticiones realmente no se programa. La única variable relacionada con el volumen que se programa es el número de series).

Por tanto, como venimos indicando y constatando en todos los apartados anteriores de esta Tesis, la velocidad de ejecución es la variable que permite estimar de manera más precisa la intensidad y el volumen, que vienen a configurar el grado de esfuerzo, como síntesis de ambas variables, durante el entrenamiento de fuerza, y como consecuencia se debe tomar como la variable de referencia para la dosificación y el control en el ejercicio de fuerza. En relación con esta nueva metodología, se ha publicado recientemente un estudio (Pareja-Blanco, et al., 2016) en el que se analizó el efecto de entrenar con dos grados de esfuerzo diferentes, determinados por la pérdida de velocidad dentro de la serie, ante el mismo rango de intensidades relativas (70 - 85% 1RM), las cuales fueron determinadas a través de la velocidad de la primera repetición de la serie. De este modo, dos grupos de sujetos físicamente activos y con experiencia previa en el entrenamiento de fuerza realizaron un entrenamiento de 8 semanas (2 sesiones por semana) en el que la única diferencia entre ambos programas de entrenamiento fue el porcentaje de pérdida de velocidad permitida dentro de la serie: 20% vs. 40%. En este estudio se pudo observar que el grupo que realizó un mayor grado de esfuerzo en cada sesión (pérdida de velocidad del 40%) mostró un mayor incremento en la hipertrofia muscular, aunque experimentó cambios en el fenotipo muscular hacia isoformas más lentas. A pesar de manifestar una menor respuesta hipertrófica, el grupo que alcanzó una menor pérdida de velocidad en la serie mostró similares o incluso mayores ganancias en la fuerza muscular, el salto vertical y el rendimiento en sprint. Así, los resultados de este estudio sugieren que la realización de un programa de entrenamiento de fuerza usando solo el ejercicio de sentadilla completa con un rango de intensidades del 70 - 85% 1RM y perdiendo el 20% de velocidad en cada serie de



entrenamiento produjo similares o mejores resultados que perder un 40%. Sin embargo, teniendo en cuenta que, ante cargas del 70 - 85% 1RM en sentadilla completa, perder un 20% de velocidad en la serie supone realizar aproximadamente el 50% de las repeticiones posibles, mientras que perder el 40% supone haber realizado el 75 - 80% de las repeticiones posibles, existe un amplio rango de porcentaje de repeticiones realizadas cuyo efecto aún no ha sido analizado. Por tanto, no podemos afirmar que pérdidas de velocidad en la serie superiores al 20% tiendan a producir menores ganancias. Además, como hemos comprobado en el **Estudio II** de la presente Tesis, el grado de esfuerzo depende no solo de la pérdida de velocidad en la serie (volumen), sino de la velocidad de la primera repetición de la serie (intensidad relativa), y que el grado de esfuerzo es diferente dependiendo del ejercicio utilizado (sentadilla completa o press de banca). Por tanto, se hace necesario la realización de estudios que permitan resolver los siguientes problemas de investigación:

1. ¿Cuál es el efecto sobre la fuerza y la resistencia muscular, el salto vertical, la aceleración en carrera y los cambios hormonales y de actividad eléctrica muscular tras la realización de programas de entrenamiento de fuerza en los que se alcanzan diferentes pérdidas de velocidad dentro de la serie (10%, 30% y 45% para el ejercicio de sentadilla completa y 15%, 40% y 55% para el ejercicio de press de banca) ante la misma intensidad relativa (55 - 70% 1RM y 70 - 85% 1RM)?
2. ¿Cuál es el efecto sobre la fuerza, la resistencia muscular, el salto vertical, la aceleración en carrera, los cambios hormonales y actividad eléctrica muscular tras la realización de programas de entrenamiento de fuerza en los que se alcanzan la misma pérdida de de velocidad dentro de la serie (10% y 30%) ante diferentes intensidad relativa (55 - 70% 1RM y 70 - 85% 1RM)?
3. ¿Difiere la respuesta mecánica y fisiológica producida por la realización de programas de entrenamiento programados en base a la velocidad de la primera de repetición y a la pérdida de velocidad en la serie en diferentes ejercicios?



## 6.2. Objetivos de la Investigación

De los problemas planteados anteriormente se derivan los siguientes objetivos:

4. Examinar el efecto de dos programas de entrenamiento realizados con la misma intensidad relativa (70 - 85% 1RM) pero con distinta pérdida de velocidad dentro de la serie: 10% y 30% para el ejercicio de sentadilla completa y 15% y 40% para el ejercicio de press de banca, sobre las ganancias de fuerza, el rendimiento físico y los cambios neurales y hormonales.
5. Analizar el efecto de tres programas de entrenamiento realizados con la misma intensidad relativa (55 - 70% 1RM) pero con distinta pérdida de velocidad dentro de la serie: 10%, 30% y 45% para el ejercicio de sentadilla completa y 15%, 40% y 55% para el ejercicio de press de banca, sobre las ganancias de fuerza, el rendimiento físico y los cambios neurales y hormonales.
6. Comparar el efecto de dos programas de entrenamiento realizados con la misma pérdida de velocidad en la serie pero con distinto rango de intensidades relativas.
7. Analizar la relación *pérdida de velocidad en la serie - cambios en el rendimiento* ante cada rango de intensidades de carga (55 - 70% 1RM y 70 - 85% 1RM) en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca
8. Analizar la relación *índice de esfuerzo - cambios en el rendimiento* en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca.

La problemática general planteada para el Estudio III se abordó a través de dos estudios parciales:

- **Estudio III.1:** Comparación de dos magnitudes de pérdida de velocidad en la serie (10% y 30% en sentadilla completa, y 15% y 40% en press de banca) ante las mismas intensidades relativas (70 - 85% 1RM) sobre el rendimiento neuromuscular y los cambios hormonales.

- **Estudio III.2:** Comparación de tres magnitudes de pérdida de velocidad en la serie (10%, 30% y 45% en sentadilla completa, y 15%, 40% y 55% en press de banca) ante las mismas intensidades relativas (55 - 70% 1RM) sobre el rendimiento neuromuscular y los cambios hormonales.

### 6.3. Hipótesis

Algunos autores han indicado que la interrelación entre la intensidad y el volumen es un elemento clave para determinar el estímulo de entrenamiento, y como consecuencia, las adaptaciones neuromusculares asociadas con el entrenamiento de fuerza (Bird, et al., 2005; Tan, 1999). En cuanto al volumen de entrenamiento, en la mayoría de los estudios se ha indicado que, para maximizar las ganancias de fuerza y masa muscular, el entrenamiento de fuerza se debe realizar siempre hasta el fallo muscular (Ahtiainen, Pakarinen, Alen, Kraemer, & Hakkinen, 2003a; Davies, Orr, Halaki, & Hackett, 2016; Drinkwater et al., 2005; Kraemer & Ratamess, 2004; Phillips, 2009; Ratamess et al., 2009; Rooney, Herbert, & Balnave, 1994; Willardson, et al., 2008). Sin embargo, un número cada vez mayor de investigaciones (Folland, Irish, Roberts, Tarr, & Jones, 2002; González-Badillo, et al., 2005; González-Badillo, et al., 2006; Izquierdo et al., 2006; Pareja-Blanco et al., 2016b; Sampson & Groeller, 2016; Sanborn et al., 2000) y revisiones científicas (Carpinelli, Otto, & Winett, 2004; Davies, et al., 2016; Willardson, Norton, & Wilson, 2010) parecen indicar que realizar el máximo volumen de entrenamiento podría no ser un estímulo necesario para producir mayores ganancias de fuerza en comparación con menores volúmenes de entrenamiento, y que, por tanto, es innecesario usar series hasta el fallo muscular para maximizar la fuerza y la hipertrofia (Davies, et al., 2016; Sampson & Groeller, 2016). De hecho, los entrenamientos llevados a cabo hasta el fallo muscular producen un mayor estrés mecánico, metabólico y hormonal (González-Badillo et al., 2016; Pareja-Blanco et al., 2016a; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011), y su uso continuado produce un deterioro considerable en la capacidad de aplicar fuerza en la unidad de tiempo (Andersen et al., 2005; Andersen, et al., 2010) y un descenso en la habilidad para realizar acciones de alta velocidad como el salto y el sprint (Pareja-Blanco, et al., 2016b). En este sentido, los diferentes estudios que han analizado el efecto de modificar el volumen de entrenamiento sobre los cambios en el rendimiento físico (González-Badillo, et al., 2005; González-Badillo, et al., 2006) sugieren que puede existir una relación curvilínea entre el volumen durante el entrenamiento de fuerza y las ganancias de fuerza (Kuipers, 1996). Esta relación indica que debe existir un volumen mínimo (umbral de volumen) para cada intensidad o rango de intensidades que produzca mejoras, y que a partir de ese *umbral* mínimo, un incremento progresivo del volumen vendrá acompañado por un aumento en las ganancias de fuerza, pero solo hasta un

cierto límite, a partir del cual, un aumento de dicho volumen de entrenamiento no producirá mayores beneficios sobre la fuerza. Incluso, si se excede un determinado valor de volumen de entrenamiento, es posible que el rendimiento pueda disminuir (González-Badillo, et al., 2005; González-Badillo, et al., 2006; González-Badillo & Ribas, 2002).

En base a los resultados de diferentes estudios llevados a cabo por nuestro grupo de investigación (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016a; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) en los que se analiza la respuesta mecánica, metabólica y hormonal aguda ante diferentes esfuerzos en los que se manipula el número de repeticiones realizado en la serie en relación con las que se pueden completar con una carga (kg) determinada, se ha propuesto la hipótesis de que no es necesario realizar más de la mitad de las repeticiones posibles dentro de cada serie de entrenamiento para obtener las mayores ganancias de fuerza. Esto se debe a que cuando se supera dicho límite las concentraciones sanguíneas de amonio, cortisol, prolactina, GH y creatin kinasa aumentan de manera exponencial, lo cual indican mayor daño y catabolismo muscular. Coincidiendo con esta hipótesis planteada, se ha encontrado que realizar la mitad de las repeticiones posibles dentro de cada serie de entrenamiento produjo aumentos de fuerza, potencia y rendimiento físico similares o incluso superiores, dependiendo de la variable analizada, que los alcanzados tras realizar el máximo número de repeticiones por serie (Izquierdo, et al., 2006). Del mismo modo, en un estudio más reciente llevado a cabo por Pareja-Blanco et al. (2016b) también se comparó el efecto de entrenar realizando la mitad de las repeticiones posibles o el máximo o casi máximo número de repeticiones por serie sobre las ganancias de fuerza y el rendimiento físico. Sin embargo, a diferencia de los estudios expuestos anteriormente (Izquierdo, et al., 2006), en vez de establecer un número de repeticiones fijas para todos los participantes en cada sesión de entrenamiento, en dicho estudio el volumen de entrenamiento se cuantificó a través de la pérdida de velocidad en la serie, las cuales se establecieron en el 20% y 40% en el ejercicio de sentadilla completa (Pareja-Blanco, et al., 2016b). En concordancia con otras investigaciones (Izquierdo, et al., 2006), los resultados de este estudio (Pareja-Blanco, et al., 2016b) mostraron que una pérdida de velocidad en la serie del 20% (que supone realizar aproximadamente la mitad de las repeticiones posibles) durante el entrenamiento de fuerza usando el ejercicio de sentadilla completa produjo ganancias de fuerza, velocidad

y salto similares o mayores a las obtenidas cuando se alcanzó una pérdida de velocidad en la serie del 40%. Los hallazgos de estos estudios nos permiten afirmar que superar la mitad de las repeticiones posibles en cada serie de entrenamiento no produce mayores beneficios sobre el rendimiento neuromuscular. Del mismo modo, en un estudio posterior llevado a cabo con jugadores de fútbol profesionales (Pareja-Blanco, Sánchez-Medina, Suarez-Arrones, & González-Badillo, 2016c) se compararon dos entrenamientos de fuerza basados en la velocidad de ejecución con la misma intensidad relativa (50 - 70% 1RM), frecuencia de entrenamiento (3 veces por semana), ejercicio (sentadilla completa), número de series y tiempo de recuperación entre series, pero con distinta pérdida de velocidad en cada serie, y se observó que el grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 15% mostró ganancias similares sobre la fuerza y el salto vertical que el grupo que entrenó alcanzando el 30% de pérdida de velocidad en cada serie.

Aunque no conocemos estudios en los que se haya analizado el efecto de entrenar con pérdidas de velocidad en la serie inferiores al 15%, existen algunos trabajos (Franco-Marquez et al., 2015; Rodríguez-Rosell et al., 2016; Rodríguez-Rosell, Torres-Torrelo, Franco-Marquez, González-Suarez, & González-Badillo, 2017; Torres-Torrelo, Rodríguez-Rosell, & González-Badillo, 2017) en los que se ha comprobado que entrenar con una intensidad relativa baja (~45 - 60% 1RM) y un bajo número de repeticiones por serie (6 - 4 repeticiones) produce incrementos significativos en la fuerza y el rendimiento físico. Aunque el volumen de entrenamiento se cuantificó a través del número de repeticiones por serie, éste coincidía aproximadamente con el número medio de repeticiones necesarios para alcanzar una pérdida de velocidad en la serie de ~10% (ver **Tabla 21, Estudio II**). Por tanto, dado que pérdidas aproximadas de velocidad en la serie del 10% producen mejoras sobre la fuerza, la velocidad y el salto vertical, y que parece que superar el 20% de pérdida de velocidad en la serie no produce beneficios adicionales, la primera hipótesis del presente estudio fue la siguiente:

***Hipótesis 1:*** *Un programa de entrenamiento permitiendo una pérdida de velocidad en la serie del 10% produce incrementos en la fuerza y el rendimiento muscular similares o superiores que otros en los que se permite una pérdida del 30% o 45%, independientemente del rango de intensidades utilizado.*

Dado que existen diferencias notables entre los ejercicios de sentadilla completa y press de banca en cuanto a masa muscular implicada en el movimiento, proporción de tipo de fibras (Mygind, 1995; Sanchis-Moysi et al., 2010), duración de la contracción, distancia/recorrido del movimiento, pérdida de velocidad en la serie ante la misma intensidad relativa (ver **Estudio I.3**), velocidad de la 1RM (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2017), y fatiga neuromuscular producida ante la misma intensidad relativa y pérdida de velocidad en la serie, e incluso, ante el mismo *índice de esfuerzo* (ver **Estudio II**) es probable que se produzcan diferentes respuestas adaptativas en ambos ejercicios. De hecho, se ha comprobado que ante entrenamientos con la misma intensidad relativa y el mismo número de series y repeticiones por serie, los cambios en la fuerza fueron mayores en el ejercicio de sentadilla completa que en el de press de banca (Rønnestad et al., 2007; Thornell, Lindstrom, Renault, Mouly, & Butler-Browne, 2003). Esto puede ser debido a que, ante la misma intensidad relativa y el mismo porcentaje de repeticiones realizado dentro de la serie, el estrés metabólico, y probablemente la respuesta hormonal aguda, es menor durante el ejercicio de press de banca que el de sentadilla completa (ver **Estudio II**). Por tanto, es probable que para obtener ganancias de fuerza similares entre ambos ejercicios sea necesario realizar un mayor porcentaje de repeticiones dentro de cada serie de entrenamiento (mayor pérdida de velocidad) en el ejercicio de press de banca comparado con el de sentadilla completa. Por ello, formulamos las siguientes hipótesis:

**Hipótesis 2:** *Ante un programa de entrenamiento con la misma intensidad relativa y el mismo porcentaje de repeticiones realizado en la serie, los cambios en la fuerza son mayores en el ejercicio de sentadilla completa que en el de press de banca.*

**Hipótesis 3:** *Ante unas mismas intensidades relativas, las mayores ganancias de fuerza en el ejercicio de press de banca se obtienen realizando un mayor porcentaje de repeticiones dentro de la serie que en el ejercicio de sentadilla completa.*

Se piensa que los cambios en la homeostasis hormonal producidos por el entrenamiento de fuerza juegan un papel fundamental en la síntesis de proteínas y el desarrollo de la fuerza muscular (Hakkinen, Pakarinen, Alen, Kauhanen, & Komi, 1988; Hoppeler, 2016; Kraemer & Ratamess, 2005; Marx et al., 2001). La respuesta hormonal aguda



después de diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza ha sido ampliamente estudiada (Ahtiainen, et al., 2003b, 2004; González-Badillo, et al., 2016; Kraemer, 1988; Kraemer et al., 1993; Kraemer et al., 1991; Kraemer et al., 1999; Kraemer et al., 1990; Pareja-Blanco, et al., 2016a; Rubin et al., 2005; Smilios, et al., 2003). Sin embargo, el efecto crónico ha recibido menos atención científica (Kraemer & Ratamess, 2005). Eso se puede deber a que la mayoría de las hormonas tienen una respuesta aguda fuerte que se revierte pasadas varias horas después del ejercicio (González-Badillo, et al., 2016; Kraemer, 1988; Kraemer, et al., 1990; Pareja-Blanco, et al., 2016a). Sin embargo, también parece que un entrenamiento de fuerza mantenido durante largos periodos puede producir alteraciones en las concentraciones hormonales basales, indicando que esas hormonas se pueden usar también como marcadores crónicos del estrés producido por el entrenamiento de fuerza (Fry & Kraemer, 1997; Kraemer & Ratamess, 2005), aunque parece que estos cambios a largo plazo tienen menos influencia sobre los cambios en el crecimiento y la remodelación muscular, ya en algunos estudios se han encontrado cambios en la hipertrofia muscular sin modificaciones significativas en las concentraciones hormonales basales (Kraemer & Ratamess, 2005).

La mayoría de los estudios en los que se ha analizado los cambios hormonales después de un periodo de intervención han utilizado protocolos de entrenamiento en los que se realizaba el máximo número de repeticiones posibles en cada serie, es decir, hasta el fallo muscular (Ahtiainen, et al., 2003a; Hakkinen, Pakarinen, Alen, Kauhanen, & Komi, 1987; Hakkinen, Pakarinen, Alen, & Komi, 1985; Kraemer, et al., 1999; Kraemer & Ratamess, 2005). En estos estudios se observó que los cambios producidos por dichos protocolos de entrenamiento dependen de la hormona analizada. Por ejemplo, en uno de estos estudios (Ahtiainen, et al., 2003a) se encontró que la concentración de testosterona basal aumentó significativamente después de 7 semanas de alto volumen de entrenamiento. Sin embargo, cuando el volumen de entrenamiento bajó, la concentración de testosterona basal volvió a los niveles mostrados antes del inicio del programa de entrenamiento (Ahtiainen, et al., 2003a). En otros estudios se observó que después de un periodo de entrenamiento de alta intensidad y bajo volumen se produjo un descenso en los niveles basales de testosterona (Kraemer & Ratamess, 2005; Raastad, Glomsheller, Bjoro, & Hallen, 2001). Los cambios basales en otras hormonas como el cortisol también parecen depender de la intensidad y el volumen de

entrenamiento realizado (Hakkinen & Pakarinen, 1991; Hakkinen, et al., 1985; Kraemer & Ratamess, 2005; Marx, et al., 2001). Sin embargo, hormonas como la GH y la IGF-1 generalmente no muestran cambios después de un periodo de entrenamiento de fuerza (Fry & Kraemer, 1997; Kraemer & Ratamess, 2005). El efecto crónico del entrenamiento de fuerza sobre otras hormonas como la prolactina aun permanece desconocido. Sin embargo, en algunos estudios se ha analizado el efecto agudo sobre esta hormona y se ha indicado que el entrenamiento de fuerza generalmente no produce cambios (Bosco, Colli, Bonomi, von Duvillard, & Viru, 2000) o produce ligeros incrementos sobre que revierten pasados 60 min post-esfuerzo (González-Badillo, et al., 2016; Kraemer, Volek, Bush, Putukian, & Sebastianelli, 1998; Pareja-Blanco, et al., 2016a).

Para nuestro conocimiento, solo existe un estudio (Izquierdo, et al., 2006) en el que se hayan analizado las concentraciones basales de diferentes hormonas antes y después de protocolos de entrenamiento de fuerza que difieren en el número de repeticiones realizado con respecto a las que se pueden completar ante una carga determinada. En este estudio (Izquierdo, et al., 2006) se realizaron 2 protocolos de fuerza, que consistieron en la realización de 3 series de 10-4RM vs. 6 series de 5-2 repeticiones con la carga de 10-4RM. Después del periodo de entrenamiento, el grupo que entrenó realizando el máximo número de repeticiones por serie mostró una reducción en la IGF-1 y un incremento en la “insulin-growth factor binding protein-3” (IGFBP-3), mientras que la concentración de testosterona y cortisol permanecieron sin cambios. En el grupo que realizó la mitad de las repeticiones posibles se produjo un descenso en las concentraciones basales de cortisol y un aumento de la concentración de testosterona, lo que significa un aumento del cociente testosterona/cortisol, y como consecuencia un balance anabólico-catabólico positivo.

Como se puede deducir de los resultados descritos anteriormente, no hay un consenso en relación con los efectos crónicos del entrenamiento sobre los valores basales de determinadas hormonas, pero en aquellos estudios en los que se ha comparado el efecto de llegar al fallo frente a no llegar y aquellos en los que se aplica un volumen bajo, se observa una tendencia a aumentar la testosterona y a la disminución del cortisol. Por lo que parece que los cambios de estas hormonas tienen relación con el volumen o el grado de esfuerzo en cada serie al que ha sido sometido el sujeto. Por otra parte, la GH, la IGF-1 y la prolactina no parecen alterarse de manera permanente ante ningún tipo de

esfuerzo. Dado que ante una intensidad relativa dada el mejor indicador del grado de fatiga o esfuerzo generado en una serie o sesión de entrenamiento es la pérdida de velocidad en la serie, es probable que la testosterona tienda a aumentar cuanto menor es el esfuerzo o fatiga en la serie (menor porcentaje de pérdida de velocidad en la serie) y el cortisol tienda a aumentar cuanto mayor es el grado de fatiga. Por tanto nuestras hipótesis son las siguientes:

***Hipótesis 4:*** *Ante una misma intensidad relativa, la concentración basal de testosterona después del periodo de entrenamiento aumenta a medida que disminuye el porcentaje de pérdida de velocidad permitido en la serie, mientras que el cortisol aumenta a medida que se incrementa dicho porcentaje.*

***Hipótesis 5:*** *Las concentraciones basales de GH, IGF-1 y prolactina se mantienen constantes después del periodo de entrenamiento independientemente del porcentaje de pérdida de velocidad permitido en la serie.*

Otro de los aspectos interesantes a analizar durante el entrenamiento de fuerza es el daño muscular producido por los diferentes protocolos llevados a cabo. Tradicionalmente, el marcador de daño muscular más utilizado ha sido la *Creatin Kinasa* (CK). Este biomarcador aumenta significativamente después de la realización de un protocolo de entrenamiento de fuerza en relación con la intensidad relativa y el volumen utilizado, alcanzando su máximo a las ~24 - 48 h post-esfuerzo (Fry & Kraemer, 1997; González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016a). Sin embargo, pasado ese periodo agudo, la CK vuelve a los valores de reposo, y los niveles basales de esta proteína no parecen mostrar cambios después del entrenamiento (Fry & Kraemer, 1997; Jurado-Lavanant et al., 2015; Shiran, Kordi, Ziaee, Ravasi, & Mansournia, 2008; Zanchi, Lira, Seelaender, & Lancha-Jr, 2010). Estos resultados parecen indicar que este marcador no tiene sensibilidad para detectar el daño muscular crónico producido por distintos programas de entrenamiento. Como alternativa, actualmente se están empezando a utilizar otros marcadores de daño muscular como la troponina T (TnT) cardiaca (Abreu et al., 2014). Este marcador se ha utilizado habitualmente para analizar el riesgo de infarto de miocardio y otras patologías renales (Collinson, Boa, & Gaze, 2001; Chapelle, 1999). En relación con el ejercicio físico, parece que la TnT aumenta después de la realización de un entrenamiento de

fuerza o resistencia (Carranza-Garcia et al., 2011; Legaz-Arrese et al., 2015; Serrano-Ostariz et al., 2011). Dado que una mayor pérdida de velocidad en la serie ante la misma intensidad relativa está asociado con la realización de un mayor número de repeticiones y que esto genera un mayor estrés mecánico, metabólico, hormonal y cardiovascular, es probable que la concentración de TnT después del entrenamiento sea más elevada cuanto mayor sea la pérdida de velocidad permitida en cada serie de entrenamiento. Por tanto nos planteamos la siguiente hipótesis:

***Hipótesis 6:*** *La concentración basal de TnT cardíaca después del periodo de entrenamiento aumenta a medida que aumenta el porcentaje de pérdida de velocidad permitido en la serie.*

Los cambios en el rendimiento físico después de un entrenamiento de fuerza dependen de factores estructurales y neurales (Folland & Williams, 2007). Las adaptaciones neurales se refieren a los cambios en el control del músculo (Adamson, Macquaide, Helgerud, Hoff, & Kemi, 2008; Sale, 1988, 1992). Estos mecanismos juegan un papel muy importante en el incremento de la fuerza después de un entrenamiento, principalmente en las primeras semanas, donde el incremento de fuerza no guarda relación con los cambios morfológicos de la musculatura (Jones & Rutherford, 1987; Moritani & deVries, 1979; Sale, 1992). Entre las principales adaptaciones neurales al entrenamiento de fuerza está la mejora de la conducción neural eferente (Aagaard, 2003; Aagaard, Simonsen, Andersen, Magnusson, & Dyhre-Poulsen, 2002a, 2002b; Holtermann, Roeleveld, Vereijken, & Ettema, 2007; Van Cutsem & Duchateau, 2005; Van Cutsem, Duchateau, & Hainaut, 1998), lo cual está estrechamente relacionado con el cambio en la frecuencia de disparo de las motoneuronas (Aagaard, 2003). Otras adaptaciones son el incremento de las llamadas “dobles descargas” (potenciales de acción con un espacio interespiga menor a 10 ms), lo cual se ha relacionado con una mejora de la fuerza muscular (Van Cutsem & Duchateau, 2005; Van Cutsem, et al., 1998). Además, también se han descrito incrementos en la excitabilidad de las motoneuronas o, lo que es lo mismo, descensos en el umbral de activación de las unidades motoras, descensos en la inhibición presináptica, una regulación a la baja de las vías nerviosas inhibitorias, una mejora en la sincronización o coordinación de las unidades motoras, así como un incremento de los niveles de conducción de las

motoneuronas descendentes (Aagaard, 2003; Aagaard, et al., 2002a, 2002b; Folland & Williams, 2007; González-Badillo & Ribas, 2002; Holtermann, et al., 2007). Todos estos factores hacen que se produzca un cambio en el patrón de activación de los músculos agonistas, antagonistas y sinergistas y, consecuentemente, un incremento de la fuerza y la RFD (Aagaard, 2003; Aagaard, et al., 2002a; Adamson, et al., 2008; Van Cutsem & Duchateau, 2005; Van Cutsem, et al., 1998).

Las evidencias de cambios adaptativos en la función neural con el entrenamiento de fuerza han sido analizadas a través del uso de la EMG de superficie. Existe una gran cantidad de estudios en los que se ha encontrado un incremento en la amplitud de la señal de EMG después de un programa de entrenamiento de fuerza, incluso en deportistas altamente entrenados en fuerza, lo cual indica la plasticidad que existe en el sistema neural (Aagaard, 2003). En la mayoría de los estudios se han analizado los cambios en la EMG obtenidos a través de activaciones estáticas o con la carga que representaba la 1RM (Aagaard, et al., 2002a; Buckthorpe, Erskine, Fletcher, & Folland, 2015; Gruber & Gollhofer, 2004; Hakkinen et al., 1998; Hakkinen, Kraemer, Newton, & Alen, 2001; Hakkinen et al., 2001; Jenkins et al., 2016; Sampson & Groeller, 2016; Tillin & Folland, 2014) y en ellos se han mostrado incrementos en la amplitud de la señal de EMG (RMS, iEMG o promedio del voltaje medio) o la frecuencia media o mediana después de distintos programas de entrenamiento de fuerza (Gruber & Gollhofer, 2004; Sampson & Groeller, 2016; Ullrich et al., 2015; Vila-Cha, Falla, & Farina, 2010). Se ha descrito que el nivel de activación muscular (medido a través de EMG de superficie) es mayor durante ejercicios con intensidades relativas moderadas-altas (75 - 85% 1RM) en comparación con intensidades relativas bajas (30% 1RM) (Jenkins et al., 2015; Schoenfeld, Contreras, Willardson, Fontana, & Tiriyaki-Sonmez, 2014), y que cuanto mayor sea el número de repeticiones realizadas dentro de la serie ante una carga determinada mayor es el número de unidades motoras activas (Fisher, Steele, Bruce-Low, & Smith, 2011). Por estos motivos, algunos autores (Looney et al., 2016) han indicado que entrenar con intensidades relativas altas y hasta el fallo muscular es más efectivo para aumentar la amplitud de la EMG que entrenar con intensidades relativas bajas. Sin embargo, cuando se ejecuta una repetición a la máxima velocidad voluntaria posible, aunque la intensidad relativa sea baja, se produce una activación simultánea de todas las unidades motoras, incluso de aquellas con mayor umbral de reclutamiento (Desmedt & Godaux, 1977, 1978), lo cual genera una mayor

amplitud en el registro de EMG (*Datos de nuestro laboratorio sin publicar*). Por tanto, es probable que, independientemente del volumen y la intensidad utilizados, realizar entrenamientos de fuerza ejecutando cada repetición a la máxima velocidad voluntaria posible induzca adaptaciones neurales. En base a estos resultados nos planteamos la siguiente hipótesis.

**Hipótesis 7:** *El entrenamiento de fuerza produce un incremento en la amplitud y el espectro de frecuencia de la EMG ( $F_{med}$  y  $F_{max}$ ), independientemente de la intensidad relativa y la pérdida de velocidad permitida en la serie.*

## **6.4. Estudio III.1:**

***Comparación de dos magnitudes de pérdida de velocidad en la serie (10% y 30% en sentadilla completa, y 15% y 40% en press de banca) ante las mismas intensidades relativas (70 - 85% 1RM) sobre el rendimiento neuromuscular y los cambios hormonales***







## 6.4. Estudio III.1: Comparación de dos magnitudes de pérdida de velocidad en la serie (10% y 30% en sentadilla completa, y 15% y 40% en press de banca) ante las mismas intensidades relativas (70 - 85% 1RM) sobre el rendimiento neuromuscular y los cambios hormonales

### 6.4.1. Metodología

#### A. Tipo de Investigación

Dadas las características de los datos, el **Estudio III.1** es una investigación *cuantitativa*. Por el grado de manipulación de las variables y los objetivos del estudio, nuestra investigación es fundamentalmente *experimental*, con la variable *pérdida de velocidad en la serie* como variable independiente. Por el enfoque del análisis de los datos, la investigación es en parte *inferencial* con las variables independientes indicadas. Por último, la investigación es de carácter fundamentalmente *longitudinal*, ya que analizamos los cambios en la respuesta mecánica y fisiológica durante un periodo aproximado de dos meses y medio.

#### B. Muestra

En este estudio participaron un total de 26 hombres sanos y físicamente activos. Todos eran estudiantes del Grado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte con al menos 6 meses de experiencia previa en el entrenamiento de fuerza. Además, estaban familiarizados con los ejercicios de press de banca y sentadilla completa porque habían participado previamente en algunas evaluaciones y tests con nuestro grupo de trabajo. Después de la evaluación inicial, los sujetos fueron ordenados según su  $1RM_{est}$  y se distribuyeron aleatoriamente mediante el procedimiento ABBA en 2 grupos que diferían únicamente en la magnitud de pérdida de velocidad (PV) permitida en cada serie de entrenamiento: Un grupo que alcanzó una pérdida de velocidad en la serie del 10% y el 15% para los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente

(PV<sub>menor</sub> ; n = 13), y otro grupo que alcanzó una pérdida de velocidad en la serie del 30% y el 40% para los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente (PV<sub>mayor</sub>; n = 13). Durante el transcurso del estudio un participante del grupo PV<sub>menor</sub> sufrió una lesión por causas ajenas a la realización del estudio y no pudo completar todas las sesiones programadas. Por tanto, no se consideró para el análisis estadístico posterior. Las características de los participantes aparecen en la **Tabla 33**. Tras ser informados del propósito de la investigación y los procedimientos experimentales, todos los participantes dieron su consentimiento por escrito, firmando el documento de Consentimiento Informado (**ANEXO I**) antes de tomar parte en el estudio.

Los requisitos necesarios para participar en este estudio han sido descritos previamente en la metodología del **Estudio I.1**. (Apartado 4.4.1.B).

**Tabla 33.** Características físicas descriptivas de los participantes en el **Estudio III.1**.

Variable	PV <sub>menor</sub> (n = 12)	PV <sub>mayor</sub> (n = 13)
Edad (años)	22.8 ± 3.1	22.2 ± 2.7
Masa corporal (kg)	79.1 ± 10.3	74.0 ± 9.1
Talla (m)	1.79 ± 0.08	1.74 ± 0.07

PV<sub>menor</sub>: Grupo que entrenó con una menor pérdida de velocidad en la serie.

PV<sub>mayor</sub>: Grupo que entrenó con una mayor pérdida de velocidad en la serie.

### C. Diseño del Estudio

El objetivo del presente estudio fue analizar el efecto del grado de pérdida de velocidad permitida dentro de la serie (grado de fatiga) sobre la fuerza, el rendimiento neuromuscular y los cambios hormonales. En las dos semanas previas a la realización de los tests, se llevaron a cabo 4 sesiones de familiarización (2 sesiones por semana) que consistieron en la realización de varias series de entrenamiento (en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca) ejecutando cada repetición a la máxima velocidad posible, y 3 series de 4 CMJ para adquirir una correcta ejecución técnica de los ejercicios. Durante estas sesiones de familiarización, los participantes eran informados en tiempo real de la velocidad a la que estaban realizando cada repetición. El periodo de

entrenamiento tuvo una duración de 8 semanas en las cuales se llevaron a cabo 16 sesiones (2 sesiones por semana) de entrenamiento en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca. Solo aquellos participantes que asistieron al 100% de las sesiones de entrenamiento se consideraron para el análisis posterior. Los dos grupos experimentales entrenaron con la misma intensidad relativa en cada sesión (70 - 85% 1RM), el mismo número de series (3 series) y el mismo tiempo de recuperación entre series (4 min). La única diferencia entre los dos grupos fue el porcentaje de pérdida de velocidad permitido en cada serie de entrenamiento: 10% (PV10%) vs. 30% (PV30%) para el ejercicio de sentadilla completa y 15% (PV15%) vs. 40% (PV40%) para el ejercicio de press de banca. Todas las sesiones de entrenamiento se realizaron en un laboratorio bajo la supervisión directa de los investigadores, a la misma hora del día ( $\pm 1$  h) para cada participante y bajo condiciones ambientales controladas y estables ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$  y  $\sim 60\%$  humedad). Se pidió a los participantes que no tomaran parte en ningún otro tipo de actividad física extenuante, entrenamientos o competiciones deportivas que pudieran influir en los resultados de la investigación durante el transcurso del presente estudio. Antes (Pre) y después (Post) de las 8 semanas de entrenamiento, los participantes fueron evaluados utilizando los siguientes test: (1) test de carrera en 20 m; (2) test de salto vertical CMJ; (3) test isoinercial con cargas progresivas en el ejercicio de sentadilla completa; (4) test de fatiga muscular en el ejercicio de sentadilla completa; (5) test isoinercial con cargas progresivas en el ejercicio de press de banca; y (6) test de fatiga muscular en el ejercicio de press de banca.

#### D. Variables Objeto de Estudio

##### *Variables independientes*

- ***Pérdida de velocidad en la serie, en porcentaje:*** Máxima porcentaje de pérdida de velocidad permitida en cada serie de entrenamiento con respecto a la mayor velocidad conseguida en la serie. Las magnitudes de pérdida de velocidad utilizadas en el presente estudio fueron 10 y 30% para el ejercicio de sentadilla completa y 15 y 40% para el ejercicio de press de banca.

### **Variables dependientes**

Las variables dependientes analizadas en el **Estudio III.1** fueron:

#### **Mecánicas:**

- ***1RM estimada ( $1RM_{est}$ ), en kg:*** Estimación de la fuerza dinámica máxima en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.
- ***VMP con las cargas comunes ( $VMP_{CC}$ ), en  $m \cdot s^{-1}$ :*** Calculada como el promedio de la VMP obtenidas con aquellas cargas absolutas del test isoinercial de cargas progresivas que fueron comunes en el test inicial y el test final para los ejercicios de sentadilla y press de banca.
- ***VMP ante cargas iguales o inferiores al ~60% 1RM ( $VMP_{CB}$ ), en  $m \cdot s^{-1}$ :*** Calculada como el promedio de la VMP obtenidas con aquellas cargas absolutas que se podían desplazar a una VMP igual o superior a  $1.00 m \cdot s^{-1}$  y  $0.80 m \cdot s^{-1}$  en el test inicial de cargas progresivas en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente.
- ***VMP ante cargas superiores al ~60% 1RM ( $VMP_{CA}$ ), en  $m \cdot s^{-1}$ :*** Calculada como el promedio de la VMP obtenidas con aquellas cargas absolutas que se podían desplazar a una VMP inferior a  $1.00 m \cdot s^{-1}$  y  $0.80 m \cdot s^{-1}$  en el test inicial de cargas progresivas en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente.
- ***VMP ante distintas cargas absolutas, en  $m \cdot s^{-1}$ :*** Cambios en la VMP obtenida con las cargas de 30, 40, 50, 60, 70 y 80 kg ( $VSQ_{30,40,50,60,70,80}$ ) en el ejercicio de sentadilla completa, y 20, 30, 40, 50, 60 kg ( $VPB_{20,30,40,50,60}$ ) en el ejercicio de press de banca.
- ***Altura en el salto vertical (CMJ), en cm:*** Promedio de los 3 saltos considerados para el análisis antes y después del programa de entrenamiento.
- ***Tiempo en 10 m ( $T10$ ), en segundos:*** Tiempo necesario en recorrer una distancia de 10 m en el test de carrera en 20 m.
- ***Tiempo en 20 m ( $T20$ ), en segundos:*** Tiempo necesario en recorrer una distancia de 20 m en el test de carrera en 20 m.

- **Número de repeticiones:** Número de repeticiones completado en los test de fatiga muscular realizados en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca.
- **Índice de esfuerzo (IE):** Promedio del producto de la mejor velocidad (normalmente la primera o la segunda repetición) de la primera serie de entrenamiento por el promedio de pérdida de velocidad de las 3 series de entrenamiento (i.e.,  $VMP_{\text{mejor}} \times \text{promedio de PV}$ ) de las 16 sesiones de entrenamiento.

En la **Tabla 34** mostramos un ejemplo de cómo se calcularon las variables  $VMP_{CC}$ ,  $VMP_{CB}$  y  $VMP_{CA}$  a partir de los valores reales obtenidos por uno de los participantes del estudio durante el test incremental de cargas progresivas en el ejercicio de sentadilla completa.

**Tabla 34.** Ejemplo de cálculo de las variables  $VMP_{CC}$ ,  $VMP_{CB}$  y  $VMP_{CA}$  a partir de los datos obtenidos por uno de los participantes en el test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de **sentadilla completa**.

	Cargas Absolutas (kg)											$VMP_{CC}$	$VMP_{CB}$	$VMP_{CA}$
	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120	130			
Pre	1.45	1.37	1.22	1.06	0.95	0.79	0.66	0.62	0.40			0.95	1.28	0.68
Post	1.62	1.54	1.39	1.29	1.13	1.05	0.95	0.80	0.70	0.58	0.45	1.16	1.46	0.93

$VMP_{CC}$ : Promedio de la velocidad media propulsiva con todas las cargas comunes durante el Pre- y el Post-test;  $VMP_{CB}$ : Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas iguales o inferiores al ~60% 1RM ( $VMP \geq 1.00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) en el pre test;  $VMP_{CA}$ : Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas superiores al ~60% 1RM ( $VMP < 1.00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) en el pre test. Los recuadros indican las velocidades tomadas en cada caso para el cálculo de cada una de las variables. Los colores están asociados con cada una de las variables: Rojo:  $VMP_{CC}$ ; Azul:  $VMP_{CB}$ ; Verde:  $VMP_{CA}$ .

### Hormonales:

- **Concentración de testosterona total, en  $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$**

- **Concentración de cortisol, en  $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$**
- **Concentración de hormona del crecimiento (GH), en  $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$**
- **Concentración de somatomedinas (insulin-like growth factor-I: IGF-I), en  $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$**
- **Concentración de prolactina, en  $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$**

#### **Biomarcadores:**

- **Concentración de troponina T cardíaca (TnT), en  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$**

#### **EMG:**

- **Root mean square (RMS), en mV:** La media cuadrática o RMS (Root Mean Square) se define como la raíz cuadrada de la media aritmética de los elementos al cuadrado. Es decir, consiste en elevar al cuadrado todas las puntuaciones, obtener después su media aritmética y extraer, finalmente, la raíz cuadrada de dicha media para volver a la unidad de medida original:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad \text{mV}$$

- **Frecuencia Mediana ( $F_{med}$ ), en Hz:** Se calcula a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT) y se define como la frecuencia que divide el espectro en dos partes equivalentes respecto a la potencia:

$$\int_0^{f_{med}} S(f) df = \int_{f_{med}}^{\infty} S(f) df \quad \text{Hz}$$

- **Frecuencia máxima ( $F_{max}$ ), en Hz:** Se calcula a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT) y se define como el valor máximo de potencia alcanzado en el espectro de la señal.

Para poder comparar los resultados del pre-test con los del post-test, los valores de EMG de cada participante obtenidos ante las distintas cargas analizadas (30 - 70 kg para el ejercicio de sentadilla completa, y 20 - 60 para el ejercicio de press de banca) se normalizaron con respecto a los valores obtenidos del registro de EMG con la carga más alta del test incremental en ambos test. De este modo, los valores de EMG correspondientes a cada carga se expresan como porcentajes de la carga máxima levantada en ese mismo test. Esta normalización se realiza porque los valores absolutos de EMG están influidos en gran medida por diversos factores como la grasa subcutánea, la forma en la que se rasure y se limpie la zona en la que se colocan los electrodos, la zona en la que se coloquen los electrodos y la orientación de los mismos, lo cual impide una comparación directa entre los valores del pre-y post-test (Hermens, Freriks, Disselhorst-Klug, & Rau, 2000; Staudenmann, Roeleveld, Stegeman, & van Dieen, 2010; Stegeman, Blok, Hermens, & Roeleveld, 2000).

#### **E. Control de Variables Extrañas**

Este apartado ya ha sido descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.E).

#### **F. Evaluaciones y Pruebas Físicas**

##### **Análisis antropométrico**

- **Masa corporal** (kg): descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F).

- **Talla** (m): descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F).

### **Análisis sanguíneo**

Las extracciones de sangre para la determinación de las concentraciones hormonales y los biomarcadores se realizaron antes de los tests físicos. Los participantes permanecieron sentados durante 20 min antes de la extracción de sangre (**Figura 39**). Las muestras se extrajeron de la vena antecubital usando agujas de calibre 20 conectadas a vacutainers®. La sangre fue centrifugada (Centrifuge 5417R, Eppendorf, Hamburgo, Alemania) a 3000 rpm (4°C) durante 15 minutos. El suero resultante fue retirado y almacenado a ~20°C. Las muestras se analizaron por duplicado, descongeladas sólo una vez y decodificadas una vez los análisis fueron realizados (i.e. procedimiento de análisis ciego). Las concentraciones de prolactina, GH, testosterona total y cortisol fueron medidas usando de electroquimioluminiscencia (Elecsys 2010 autoanalyzer, Roche Diagnostics, Indianapolis, USA). IGF-1 se analizó por ensayos inmuno-métricos de quimioluminiscencia (Immulite 2000 System, Siemens, Los Angeles, USA), mientras que la troponina T se analizó utilizando el ensayo de tercera generación TROP T STAT por inmuno-ensayos de electroquimioluminiscencia (Elecsys 1010 automated batch analyser, Roche Diagnostics, Lewes, United Kingdom). La sensibilidad de los ensayos fue de 0.087 nmol·L<sup>-1</sup>, 8.5 nmol·L<sup>-1</sup>, 0.03 µg·L<sup>-1</sup>, 20 µg·L<sup>-1</sup>, 0.047 µg·L<sup>-1</sup> y 0.01 µg·L<sup>-1</sup> para testosterona, cortisol, GH, prolactina, IGF-1 y TnT respectivamente; con un CV intra-ensayo de 2.0%, 1.7%, 2.3%, 2.9%, 1.3% y 5.4%, respectivamente. Las concentraciones no se corrigieron para los posibles cambios en el volumen plasmático ya que se ha demostrado que los receptores en los tejidos diana son expuestos a los valores hormonales en suero (Rubin et al., 2005).





**Figura 39.** Extracción de la muestra de sangre para el análisis bioquímico.

### **Pruebas físicas**

- **Test de velocidad en 20 m:** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 5.4.F). El CCI para T10 y T20 fueron 0.903 (0.783 - 0.953) y 0.973 (0.940 - 0.988), respectivamente, mientras que el CV fue de 1.8% y 1.0%, respectivamente.
- **Test de salto con contramovimiento (CMJ):** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 5.4.F). El test de CMJ mostró un bajo CV (1.6%) y un alto CCI [0.995 (0.991 - 0.998)].
- **Test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de sentadilla completa:** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 5.4.F). Antes de la realización del test se procedió a la colocación de los electrodos para el registro y adquisición de la actividad eléctrica muscular en los músculos RF y VL. El procedimiento de colocación y adquisición de los datos también ha sido descrito previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 5.4.F).

- **Test de fatiga muscular en el ejercicio de sentadilla completa:** Cinco minutos después de completar la última carga correspondiente al test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de sentadilla completa, los participantes realizaron un test de fatiga muscular. El test consistió en la realización del máximo número de repeticiones posible con una carga absoluta (kg). Esta carga era la máxima que el sujeto podía desplazar a  $\sim 0.83 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $\sim 70\%$  1RM). Una vez seleccionada, el sujeto realizaba repeticiones de manera continua a la máxima velocidad posible hasta que la VMP era inferior a  $0.50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Para poder estimar el cambio en la resistencia muscular, durante el post-test se utilizó la misma carga absoluta (kg) que la utilizada en el test inicial. A continuación se muestra una tabla en la que aparece un resumen de las principales variables mecánicas del test (**Tabla 35**).

**Tabla 35.** Resumen de las principales variables que definen el test de fatiga muscular en el ejercicio de sentadilla completa.

Grupo	Pre			Post		
	Carga (kg)	VMP <sub>mejor</sub>	VMP <sub>última</sub>	Carga (kg)	VMP <sub>mejor</sub>	VMP <sub>última</sub>
VL10%	67.5 ± 10.7	0.86 ± 0.04	0.47 ± 0.06	67.5 ± 10.7	1.03 ± 0.09	0.42 ± 0.05
VL30%	63.8 ± 9.8	0.85 ± 0.06	0.45 ± 0.06	63.8 ± 9.8	0.98 ± 0.08	0.44 ± 0.05

PV10%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 10%; PV30%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 30%; Pre: Test inicial; Post: Test final; VMP<sub>mejor</sub>: Velocidad media propulsiva de la repetición más rápida de la serie (normalmente la primera repetición); VMP<sub>última</sub>: Velocidad media propulsiva de la última repetición de la serie.

- **Test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de press de banca:** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F). Antes de la realización del test se procedió a la colocación de los electrodos para el registro y adquisición de la actividad eléctrica muscular. Los registros de EMG se realizaron mediante electrodos de superficie (Ag-AgCl), desechables, adhesivos, de 10 mm de diámetro (marca: Ambu; modelo: Blue sensor L) y con un gel conductor para asegurar el paso de corriente de la piel al electrodo. Los electrodos se colocaron siempre sobre el miembro superior derecho de los participantes. La ubicación de los electrodos se determinó mediante la palpación de los músculos a estudiar en estado de tensión (contracción), que en

nuestro caso fueron el pectoral (PEC) y el tríceps (TRI). La localización correcta del electrodo de superficie es la zona intermedia entre la zona de inervación de los músculos y el tendón muscular como figura en las Recomendaciones Europeas para la Electromiografía de Superficie (SENIAM) (Hermens, et al., 2000; Stegeman, et al., 2000), ya que cuando el electrodo se ubica en una zona demasiado próxima al tendón, la señal registrada es de muy baja amplitud y si se sitúan sobre la unión neuromuscular, la señal se contamina con procesos sinápticos (**Figura 40**). La determinación de la ubicación de los electrodos se realizó durante el pre-test. Para asegurar que los electrodos se colocaron en el mismo lugar durante el post-test, se realizó una marcación de los electrodos sobre la piel de los participantes con un marcador de piel indeleble (Edding 8020, Madrid, España), el cual fue repasado cada sesión de entrenamiento. Para mejorar la adquisición de la señal, se preparó previamente la piel de los participantes afeitando y limpiando con alcohol la zona de registro. Esta técnica fue designada para reducir la impedancia de la piel a un valor menor a 5 k ohm ( $\Omega$ ) a fin de obtener una señal eléctrica de calidad. Si la impedancia medida era superior a 5 k  $\Omega$ , se quitaron los electrodos y se realizaron nuevamente los procedimientos de preparación. Además, para mejorar los registros de EMG, se sostuvieron los cables con una malla elástica para evitar el desplazamiento y su posible interferencia sobre la señal de EMG (**Figura 40**). El mismo investigador identificó los puntos anatómicos y colocó los electrodos en todas las sesiones y para todos los participantes. Se colocaron dos parejas de electrodos en la superficie cutánea para cada músculo indicado (PEC y TRI). La separación entre electrodos fue de 20 mm. Un quinto electrodo de referencia monopolar se colocó sobre una zona no musculada (cresta ilíaca anterosuperior). Una vez colocados los electrodos se procedió a la realización del test.



**Figura 40.** Representación gráfica de la colocación de los electrodos para el registro de la señal de EMG durante el ejercicio de **press de banca**.

- **Test de fatiga muscular en el ejercicio de press de banca:** Cinco minutos después de completar la última carga correspondiente al test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de press de banca, los participantes realizaron un test de fatiga muscular. El test consistió en la realización del máximo número de repeticiones posible con una carga absoluta (kg). Esta carga era la máxima que el sujeto podía desplazar a  $\sim 0.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ( $\sim 61\%$  1RM). Una vez seleccionada, el sujeto realizaba repeticiones de manera continua a la máxima velocidad posible hasta alcanzar el fallo muscular. Para poder estimar el cambio en la resistencia muscular, durante el post-test se utilizó la misma carga absoluta (kg) que la utilizada en el test inicial. En la **Tabla 36** aparece un resumen de las principales variables mecánicas del test.

**Tabla 36.** Resumen de las principales variables que definen el test de fatiga muscular en el ejercicio de **press de banca**.

Grupo	Pre			Post		
	Carga (kg)	VMP <sub>mejor</sub>	VMP <sub>última</sub>	Carga (kg)	VMP <sub>mejor</sub>	VMP <sub>última</sub>
VL15%	43.3 ± 11.9	0.78 ± 0.04	0.15 ± 0.03	43.3 ± 11.9	0.84 ± 0.06	0.16 ± 0.04
VL40%	40.0 ± 7.1	0.75 ± 0.06	0.14 ± 0.06	40.0 ± 7.1	0.85 ± 0.04	0.15 ± 0.03

PV15%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 15%; PV40%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 40%; Pre: Test inicial; Post: Test final; VMP<sub>mejor</sub>: Velocidad media propulsiva de la repetición más rápida de la serie (normalmente la primera repetición); VMP<sub>última</sub>: Velocidad media propulsiva de la última repetición de la serie.

- **Protocolo de entrenamiento:** Todos los participantes llevaron a cabo 16 sesiones de entrenamiento de fuerza en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca distribuidas en 8 semanas (2 sesiones por semana). Todas las variables que definen el entrenamiento tales como la intensidad relativa (55 - 70% 1RM), el número de series (tres), el tiempo de recuperación entre series (4 min) y el tiempo de recuperación entre sesiones (48 - 72 h) fueron iguales para los dos grupos experimentales, excepto el porcentaje de pérdida de velocidad permitido en cada serie de entrenamiento: 10 y 30% en el ejercicio de sentadilla completa y 15 y 40% en el ejercicio de press de banca. Las características del programa de entrenamiento de fuerza realizado en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca se encuentran descritas en las **Tablas 37 y 38**. La intensidad relativa para cada participante en cada sesión de entrenamiento se determinó a partir de la relación porcentaje de 1RM-velocidad en los ejercicios de press de banca y sentadilla, ya que se ha encontrado que existe una estrecha relación entre el porcentaje de 1RM y la velocidad media propulsiva (VMP) en ambos ejercicios (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2017). Así, se usó una determinada VMP objetivo en cada sesión como estimación del porcentaje de 1RM. Esta velocidad tenía que ser alcanzada durante la primera o segunda repetición de la primera serie de entrenamiento. Dichas velocidades objetivo fueron las siguientes: 1)  $\sim 0.82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (70% 1RM),  $\sim 0.75 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (75% 1RM),  $\sim 0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (80% 1RM), y  $\sim 0.60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (85% 1RM) para el ejercicio de sentadilla completa (Pallares, et al., 2014; Sánchez-Medina, et al., 2017); 2)  $\sim 0.62 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (70% 1RM),  $\sim 0.55 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (75% 1RM),  $\sim 0.47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (80% 1RM), y  $\sim 0.40 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (85% 1RM), para el ejercicio de press de banca (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010). Para poder ajustar la velocidad de ejecución a la velocidad asociada ( $\pm 0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) con cada porcentaje de 1RM objetivo de cada sesión, la carga absoluta (kg) se ajustó individualmente para cada participante durante cada sesión. El volumen de entrenamiento se estimó objetivamente a través de la pérdida de velocidad alcanzada en cada serie de entrenamiento. Así, dependiendo del grupo en el que fueron incluidos, cada participante realizó repeticiones en la serie hasta alcanzar un 10 o un 30% de pérdida de velocidad con respecto a la mayor VMP alcanzada en dicha serie para el ejercicio de sentadilla completa, o un 15 o 40% para el ejercicio de press de banca. Tanto en el ejercicio de sentadilla completa como en el de press de banca, el grupo de menor pérdida comenzó desde la primera sesión con la pérdida de velocidad

asignada (10% en sentadilla completa y 15% en press de banca). Sin embargo, el grupo de mayor pérdida realizó una progresión en la pérdida de velocidad permitida en la serie de una sesión (**Tablas 37 y 38**) Hay que tener en cuenta que, con las intensidades relativas utilizadas en el presente estudio (70 - 85% 1RM): (1) una pérdida de velocidad en la serie del 10% en sentadilla completa y 15% en press de banca supone realizar el ~32 - 40% y ~31 - 45% de las repeticiones realizables, respectivamente; y (2) una pérdida de velocidad en la serie del 30% en sentadilla completa y 40% en press de banca supone realizar el ~64 - 70% y ~65 - 77% de las repeticiones realizables, respectivamente (ver **Estudio I.1** y **Estudio I.3**). Por tanto, realizamos una progresión en el grupo de mayor pérdida de velocidad en la serie para intentar asemejar el entrenamiento realizado a la realidad de la práctica deportiva y permitir a los participantes adaptarse progresivamente a las *cargas* de entrenamiento. Como hemos comprobado en el **Estudio II** de la presente Tesis Doctoral, realizar sesiones con una pérdida de velocidad en la serie del 30% en el ejercicio de sentadilla completa y 40% en el ejercicio de press de banca produce un alto estrés mecánico, metabólico y neuromuscular. Por tanto, si no hacíamos esta progresión en la pérdida de velocidad en la serie en el grupo de mayor pérdida de velocidad, teníamos una alta probabilidad de que los participantes no fueran capaces de soportar las *cargas* durante todo el ciclo de entrenamiento. Todas las repeticiones de todos los participantes durante todas las sesiones fueron registradas mediante un transductor lineal de velocidad (T-Force system). Antes de realizar las 3 series de entrenamiento con el peso más alto programado para cada sesión, se realizó un calentamiento estandarizado con cargas inferiores, el cual fue el mismo para los 2 grupos experimentales y consistió en lo siguiente: (1) para las sesiones 1 - 6, dos series de 5 repeticiones con el 50 y 60% 1RM; (2) para las sesiones 7 - 13, tres serie de 5, 5 y 3 repeticiones con el 50, 60 y 70% 1RM, respectivamente; (3) para las sesiones 14 - 16, cuatro serie de 5, 5, 3 y 1 repeticiones con el 50, 60, 70 y 80% 1RM, respectivamente. El tiempo de recuperación entre series durante el calentamiento fue de 3 min.

**Tabla 37.** Características descriptivas de los protocolos de entrenamiento de fuerza realizados en cada sesión para el ejercicio de **sentadilla completa**.

<i>Programado</i>	<i>Sesión 1</i>	<i>Sesión 2</i>	<i>Sesión 3</i>	<i>Sesión 4</i>	<i>Sesión 5</i>	<i>Sesión 6</i>	<i>Sesión 7</i>	<i>Sesión 8</i>
<b>Series x PV (%)</b>								
PV10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%
PV30%	3 x 20%	3 x 25%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 25%	3 x 30%
<b>VMP objetivo (m·s<sup>-1</sup>)</b>	~0.82	~0.82	~0.82	~0.82	~0.82	~0.82	~0.75	~0.75
	(70% 1RM)	(70% 1RM)	(70% 1RM)	(70% 1RM)	(70% 1RM)	(70% 1RM)	(75% 1RM)	(75% 1RM)
<b>Realizado</b>								
<b>PV (%)</b>								
PV10%	11.9 ± 2.0	11.2 ± 2.2	12.0 ± 2.3	10.2 ± 2.1	11.3 ± 1.6	11.1 ± 2.1	10.7 ± 2.1	10.9 ± 2.3
PV30%	20.3 ± 2.6	27.0 ± 3.8	29.3 ± 1.8	30.4 ± 3.6	30.1 ± 3.1	30.2 ± 3.1	25.9 ± 2.9	31.0 ± 3.8
<b>VMP promedio (m·s<sup>-1</sup>)</b>								
PV10%	0.82 ± 0.03	0.84 ± 0.03	0.81 ± 0.02	0.83 ± 0.02	0.82 ± 0.02	0.82 ± 0.02	0.75 ± 0.02	0.75 ± 0.02
	(~70.4% 1RM)	(~69.3% 1RM)	(~71.0% 1RM)	(~69.8% 1RM)	(~70.4% 1RM)	(~70.3% 1RM)	(~75.1% 1RM)	(~75.0% 1RM)
PV30%	0.82 ± 0.03	0.84 ± 0.03	0.82 ± 0.02	0.82 ± 0.03	0.83 ± 0.02	0.82 ± 0.03	0.75 ± 0.02	0.75 ± 0.02
	(~70.3% 1RM)	(~69.6% 1RM)	(~70.6% 1RM)	(~70.3% 1RM)	(~70.2% 1RM)	(~70.4% 1RM)	(~75.1% 1RM)	(~75.1% 1RM)

Tabla 37. Continuación

<i>Programado</i>	<i>Sesión 9</i>	<i>Sesión 10</i>	<i>Sesión 11</i>	<i>Sesión 12</i>	<i>Sesión 13</i>	<i>Sesión 14</i>	<i>Sesión 15</i>	<i>Sesión 16</i>
<b>Series x PV (%)</b>								
PV10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%
PV30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%
<b>VMP objetivo (m·s<sup>-1</sup>)</b>	~0.75	~0.75	~0.68	~0.68	~0.68	~0.60	~0.60	~0.60
	(75% 1RM)	(75% 1RM)	(80% 1RM)	(80% 1RM)	(80% 1RM)	(85% 1RM)	(85% 1RM)	(85% 1RM)
<b>Realizado</b>								
<b>PV (%)</b>								<b>Total</b>
PV10%	10.9 ± 1.7	10.1 ± 2.5	10.2 ± 2.5	10.7 ± 2.6	11.4 ± 2.7	9.7 ± 2.4	11.6 ± 2.0	11.0 ± 2.1
PV30%	30.1 ± 2.6	30.6 ± 3.1	31.2 ± 3.8	31.9 ± 4.8	30.4 ± 2.6	31.0 ± 4.0	30.1 ± 2.8	30.9 ± 3.1
<b>VMP promedio (m·s<sup>-1</sup>)</b>								
PV10%	0.75 ± 0.02	0.75 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.70 ± 0.04	0.69 ± 0.03	0.61 ± 0.02	0.60 ± 0.03	0.60 ± 0.02
	(~75.4% 1RM)	(~75.1% 1RM)	(~79.6% 1RM)	(~78.5% 1RM)	(~79.3% 1RM)	(~83.9% 1RM)	(~85.0% 1RM)	(~84.9% 1RM)
PV30%	0.76 ± 0.02	0.75 ± 0.03	0.68 ± 0.02	0.68 ± 0.02	0.69 ± 0.02	0.60 ± 0.02	0.60 ± 0.03	0.61 ± 0.02
	(~74.6% 1RM)	(~75.0% 1RM)	(~79.5% 1RM)	(~79.8% 1RM)	(~79.2% 1RM)	(~84.8% 1RM)	(~84.8% 1RM)	(~84.2% 1RM)

PV: Pérdida de velocidad; VMP: Velocidad media propulsiva; 1RM: Una repetición máxima.



**Tabla 38.** Características descriptivas de los protocolos de entrenamiento de fuerza realizados en cada sesión para el ejercicio de **press de banca**.

<i>Programado</i>	<i>Sesión 1</i>	<i>Sesión 2</i>	<i>Sesión 3</i>	<i>Sesión 4</i>	<i>Sesión 5</i>	<i>Sesión 6</i>	<i>Sesión 7</i>	<i>Sesión 8</i>
<b>Series x PV (%)</b>								
PV15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%
PV40%	3 x 25%	3 x 30%	3 x 35%	3 x 40%	3 x 40%	3 x 40%	3 x 30%	3 x 40%
<b>VMP objetivo (m·s<sup>-1</sup>)</b>	~0.62	~0.62	~0.62	~0.62	~0.62	~0.62	~0.55	~0.55
	(70% 1RM)	(70% 1RM)	(70% 1RM)	(70% 1RM)	(70% 1RM)	(70% 1RM)	(75% 1RM)	(75% 1RM)
<b>Realizado</b>								
<b>PV (%)</b>								
PV15%	16.3 ± 2.1	16.5 ± 2.8	15.8 ± 2.3	15.1 ± 1.3	17.9 ± 3.4	16.7 ± 3.2	18.0 ± 5.9	16.8 ± 2.2
PV40%	27.9 ± 3.0	29.8 ± 2.2	36.5 ± 2.8	41.4 ± 4.6	41.7 ± 3.9	41.2 ± 3.4	29.2 ± 3.3	43.1 ± 4.6
<b>VMP promedio (m·s<sup>-1</sup>)</b>								
PV15%	0.62 ± 0.02	0.62 ± 0.03	0.62 ± 0.02	0.64 ± 0.01	0.62 ± 0.02	0.62 ± 0.02	0.55 ± 0.02	0.56 ± 0.02
PV40%	(~70.0% 1RM)	(~70.1% 1RM)	(~69.9% 1RM)	(~68.9% 1RM)	(~69.8% 1RM)	(~69.7% 1RM)	(~74.3% 1RM)	(~73.9% 1RM)
	0.62 ± 0.03	0.64 ± 0.04	0.63 ± 0.02	0.63 ± 0.03	0.62 ± 0.03	0.62 ± 0.02	0.55 ± 0.02	0.55 ± 0.02
	(~69.7% 1RM)	(~68.5% 1RM)	(~69.5% 1RM)	(~69.6% 1RM)	(~70.3% 1RM)	(~69.8% 1RM)	(~74.3% 1RM)	(~74.2% 1RM)

Tabla 38. Continuación.

<i>Programado</i>	<i>Sesión 9</i>	<i>Sesión 10</i>	<i>Sesión 11</i>	<i>Sesión 12</i>	<i>Sesión 13</i>	<i>Sesión 14</i>	<i>Sesión 15</i>	<i>Sesión 16</i>
<b>Series x PV (%)</b>								
PV15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%
PV40%	3 x 40%	3 x 40%	3 x 30%	3 x 40%	3 x 40%	3 x 35%	3 x 35%	3 x 35%
<b>VMP objetivo (<math>\text{m}\cdot\text{s}^{-1}</math>)</b>	-0.55 (75% 1RM)	-0.55 (75% 1RM)	-0.47 (80% 1RM)	-0.47 (80% 1RM)	-0.47 (80% 1RM)	-0.40 (85% 1RM)	-0.40 (85% 1RM)	-0.40 (85% 1RM)
<b>Realizado</b>								
<b>PV (%)</b>								<b>Total</b>
PV15%	15.7 ± 2.2	16.0 ± 3.9	15.9 ± 3.4	17.2 ± 3.2	15.8 ± 3.2	12.4 ± 3.5	14.3 ± 4.9	15.9 ± 1.0
PV40%	43.5 ± 4.6	41.8 ± 3.6	31.6 ± 4.1	42.1 ± 3.8	39.3 ± 3.1	35.9 ± 4.1	37.7 ± 3.5	37.4 ± 1.7
<b>VMP promedio (<math>\text{m}\cdot\text{s}^{-1}</math>)</b>								
PV15%	0.54 ± 0.02 (~74.9% 1RM)	0.55 ± 0.03 (~74.5% 1RM)	0.47 ± 0.02 (~79.4% 1RM)	0.48 ± 0.01 (~78.8% 1RM)	0.49 ± 0.02 (~78.6% 1RM)	0.41 ± 0.02 (~83.8% 1RM)	0.41 ± 0.01 (~83.4% 1RM)	0.54 ± 0.01 (~75.2% 1RM)
PV40%	0.55 ± 0.02 (~74.2% 1RM)	0.54 ± 0.02 (~74.9% 1RM)	0.47 ± 0.02 (~79.4% 1RM)	0.48 ± 0.01 (~79.1% 1RM)	0.48 ± 0.02 (~78.9% 1RM)	0.41 ± 0.02 (~84.0% 1RM)	0.41 ± 0.01 (~83.9% 1RM)	0.54 ± 0.01 (~75.3% 1RM)

PV: Pérdida de velocidad; VMP: Velocidad media propulsiva; 1RM: Una repetición máxima.

## **G. Instrumental de Evaluación**

### ***Máquina tipo Smith***

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.G).

### ***Transductor lineal de velocidad***

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio I.1**. (Apartado 4.4.1.G).

### ***Plataforma dinamométrica***

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio I.2**. (Apartado 4.5.1.G).

### ***Electromiógrafo***

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 5.4.G).

### ***Plataforma de salto***

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 5.4.G).

### ***Células fotoeléctricas***

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 5.4.G).

## H. Plan de trabajo

El presente estudio tuvo una duración total de 10 semanas. Durante ese tiempo, cada participante realizó un total de 2 sesiones de evaluación y 16 sesiones de entrenamiento de fuerza. Los test fueron realizados en una sola sesión siguiendo el mismo orden (test de carrera en 20 m, test de salto vertical CMJ, test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de sentadilla completa, test de fatiga muscular en el ejercicio de sentadilla completa, test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de press de banca, test de fatiga muscular en el ejercicio de press de banca), en las mismas instalaciones, a la misma hora del día ( $\pm 1$ h) para cada participante, en las mismas condiciones ambientales y bajo la supervisión de los mismos evaluadores. Antes de la realización de los test físicos, los participantes tenían que llegar al laboratorio y después de 20 min sentados fueron requeridos para tomar las muestras de sangre necesarias para el análisis bioquímico. Durante la evaluación inicial se registró la última comida realizada, la hora a la que la realizaron y las horas de sueño previas de cada participante, y se pidió que volvieran a repetir la misma rutina durante el post-test para controlar la influencia de estos factores sobre las concentraciones hormonales y el rendimiento físico. Para las sesiones de evaluación, se establecieron 4 turnos (10:00 h, 12:00 h, 16:00 h, 18:00 h) en cada uno de los cuales se evaluó a 3 participante. Por tanto, se necesitaron 2 días consecutivos para la evaluación de los 26 participantes. Las sesiones de entrenamiento tuvieron una duración de  $\sim 1$  h y se realizaron siempre en el mismo orden: sentadilla completa y press de banca. El tiempo de recuperación entre cada ejercicio fue de  $\sim 15$  min. Se establecieron 4 días (lunes y jueves o martes y viernes) y 8 turnos (10:00 h, 11:00 h, 12:00 h, 13:00 h, 16:00 h, 17:00 h, 18:00 h y 19:00 h) durante cada día para que los participantes pudieran elegir la hora a la que realizar los entrenamientos. Después de la primera semana de entrenamiento, se prestó especial atención a que los participantes realizaran los sucesivos entrenamientos los mismos días y a las mismas horas ( $\pm 1$ h) para intentar eliminar posibles variables contaminantes.

## I. Análisis estadístico

La media y la desviación típica (DT) se calculó a través de métodos estadísticos estandarizados. La fiabilidad relativa fue analizada a través del coeficiente de correlación intraclase (CCI), el cual se calculó utilizando el modelo de un factor con

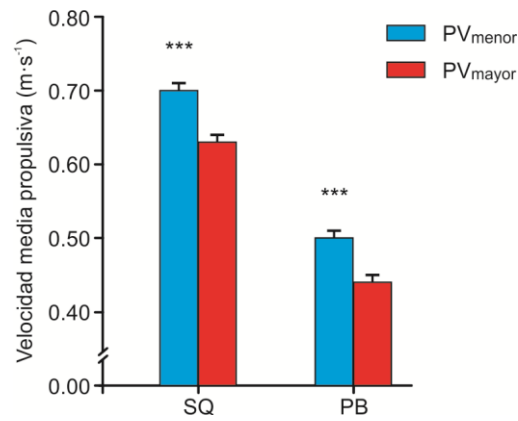
efectos aleatorios y un intervalo de confianza del 95%. Este modelo es el más exigente, ya que tiene en consideración las diferencias entre las medias de las puntuaciones. La fiabilidad absoluta se calculó usando el error estándar de medida ( $SEM = \sqrt{\text{Media Cuadrática de Error}}$ ). Los valores de SEM fueron expresados como porcentaje de sus respectivas medias a través del CV (Atkinson & Nevill, 1998). Los cálculos de fiabilidad se realizaron con los valores obtenidos en el pre-test. La homogeneidad de varianzas entre grupos se verificó usando el test de Levene. Para comprobar la normalidad de la distribución en cada una de las variables se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk. Para analizar los cambios producidos por el entrenamiento sobre cada una de las variables analizadas se utilizó un ANOVA factorial 2x2 con medidas repetidas usando un factor entre-grupos ( $PV_{\text{menor}}$  vs.  $PV_{\text{mayor}}$ ) y un factor intra-grupo (Pre-test vs. Post-test). Para analizar la evolución del CMJ y la 1RM en cada semana se utilizó un ANOVA factorial 2x10 con medidas repetidas usando un factor entre-grupos ( $PV_{\text{menor}}$  vs.  $PV_{\text{mayor}}$ ) y un factor intra-grupo (Pre-test vs. semanas 1-8 vs. Post-test). Para analizar las diferencias entre grupos se calculó el porcentaje de cambio para cada variable  $[(\text{Post} - \text{Pre}/\text{Pre}) \times 100]$  y se aplicó una prueba  $t$  para muestras independientes. La eficiencia para cada variable se calculó como el cociente entre el número medio de repeticiones realizado por cada grupo ( $PV_{\text{menor}}$  vs.  $PV_{\text{mayor}}$ ) y el porcentaje de cambio obtenido en cada variable. Además del análisis de hipótesis nula, se realizó un análisis basado en la magnitud de cambio (Batterham & Hopkins, 2006; Hopkins, et al., 2009). Las diferencias estandarizadas o los tamaños del efecto (TE) para los cambios en las variables dependientes entre-grupos ( $PV_{\text{menor}}$  vs.  $PV_{\text{mayor}}$ ) se calcularon usando los valores de la DT del Pre-test combinada de los 2 grupos comparados (Batterham & Hopkins, 2006; Hopkins, Marshall, Batterham, & Hanin, 2009). Para las comparaciones entre grupos, se calculó la probabilidad de que los valores reales (desconocido) para cada grupo experimental fuesen *beneficioso/mejor* [i.e., mayor que el mínimo cambio apreciable ( $0.2 \times \text{DT entre-sujetos del Pre-test}$ , basado en el principio de TE de Cohen)], *no claro*, *perjudicial/peor* para el rendimiento. La probabilidad cuantitativa de que un efecto fuese *beneficioso/mejor* o *perjudicial/peor* se calculó cualitativamente como sigue: <1%, casi seguro que no; 1-5%, muy poco probable; 5-25%, poco probable; 25-75%, posible; 75-95%, probable; 95-99%, muy probable; y >99%, casi seguro. Si las probabilidades de tener un efecto *beneficioso/mejor* o *perjudicial/peor* fueron ambas >10%, la verdadera diferencia fue evaluada como *no clara* (Batterham & Hopkins, 2006; Hopkins, et al., 2009). Para todas

las pruebas de hipótesis nula, el nivel de significación estadístico se fijó en el 5% ( $P \leq 0.05$ ) y todos los análisis fueron realizados utilizando el paquete de software estadístico SPSS versión 17.0 (SPSS, Chicago, IL). Los análisis basados en la magnitud de cambio se llevaron a cabo utilizando la hoja de Excel creada por Hopkins (Hopkins, 2006).

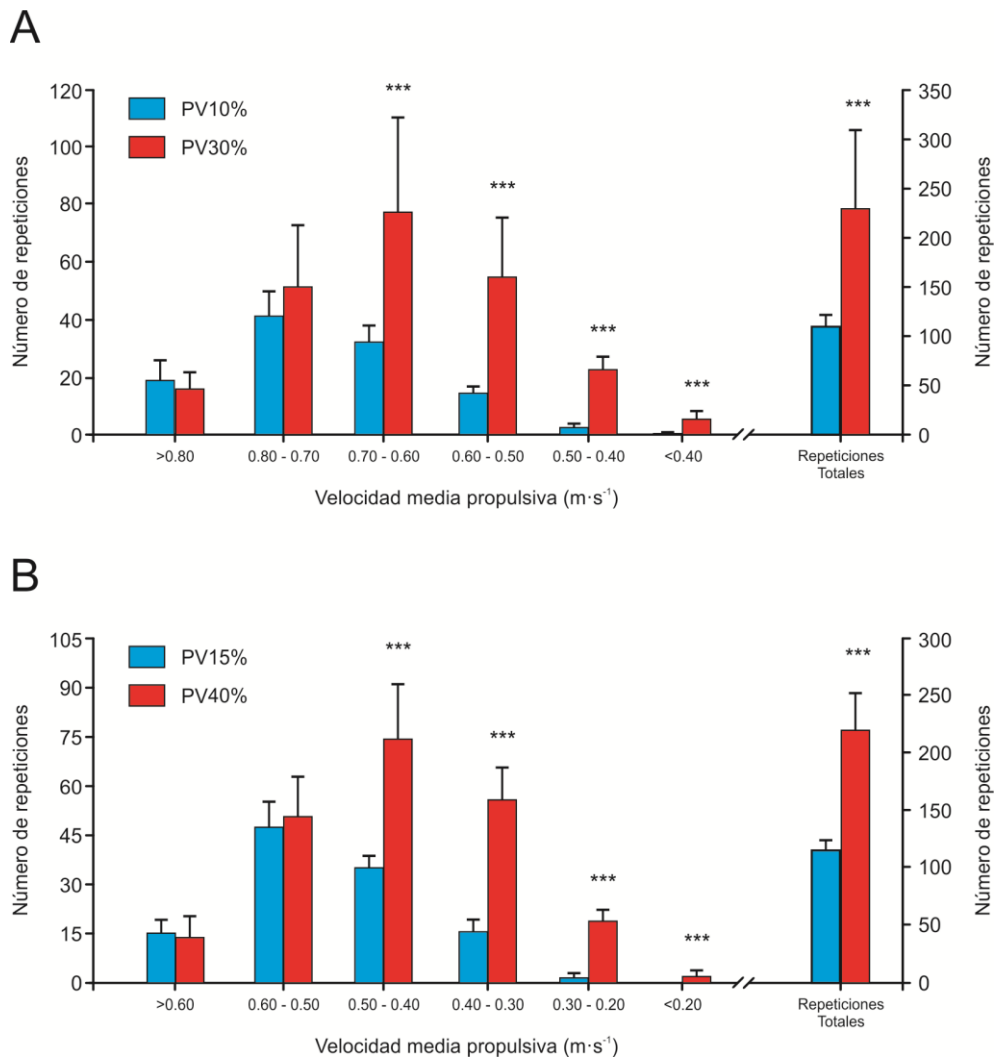
## 6.4.2. Resultados

### ***Análisis del entrenamiento realizado***

En las **Tablas 37 y 38** aparece un resumen con las características de los entrenamientos realizados por cada grupo en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente. En ellas se puede observar cómo la mejor VMP de la primera serie de entrenamiento (intensidad relativa) y el promedio de pérdida de VMP de las tres series realizadas en cada sesión se ajustó a lo *programado*. No hubo diferencias significativas en la VMP de la primera serie de cada sesión de entrenamiento entre los 2 grupos experimentales en ninguno de los dos ejercicios entrenados. Los participantes del grupo PV<sub>menor</sub> entrenaron a una velocidad media significativamente ( $p < 0.001$ ) mayor (SQ:  $0.70 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , PB:  $0.50 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) que los participantes del grupo PV<sub>mayor</sub> (SQ:  $0.63 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , PB:  $0.44 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) (**Figura 41**). El promedio de repeticiones totales realizado con la carga más alta de cada sesión de entrenamiento fue significativamente mayor ( $p < 0.001$ ) en el grupo PV<sub>mayor</sub> (SQ:  $229.4 \pm 80.0$ , PB:  $219.2 \pm 39.4$ ) que en el grupo PV<sub>menor</sub> (SQ:  $109.6 \pm 12.0$ , PB:  $114.8 \pm 8.7$ ). En la **Figura 42** aparece el número de repeticiones medio realizado en diferentes rangos de velocidad en los ejercicios de sentadilla completa (**Figura 42A**) y press de banca (**Figura 42B**). No se encontraron diferencias significativas entre grupos en el número de repeticiones realizado en los rangos de velocidad más altos en ambos ejercicios (SQ:  $0.90 - 0.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , PB:  $0.70 - 0.50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Con velocidades inferiores a  $0.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  en sentadilla completa y  $0.50 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  en press de banca, los participantes del grupo PV<sub>mayor</sub> realizaron un mayor número de repeticiones en cada rango de velocidad que los participantes del grupo PV<sub>menor</sub>.



**Figura 41.** Velocidad media de entrenamiento para cada grupo (PV<sub>menor</sub> y PV<sub>mayor</sub>) en los ejercicios de **sentadilla completa** y **press de banca**. Las barras de error representan la DT. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV<sub>mayor</sub>: \*\*\*  $p < 0.001$ .



**Figura 42.** Número de repeticiones realizado en cada rango de velocidad y número de repeticiones totales completadas por cada grupo (PV<sub>menor</sub> y PV<sub>mayor</sub>) para los ejercicios de **sentadilla completa** (A) y **press de banca** (B). Las barras de error representan la DT. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV<sub>menor</sub>: \*\*\*  $p < 0.001$ .



### **Cambios en la fuerza y la resistencia muscular**

Ambos grupos experimentales mostraron un aumento significativo en las variables  $1RM_{est}$ ,  $VMP_{CC}$ ,  $VMP_{CB}$ ,  $VMP_{CA}$  y test de fatiga tanto en el ejercicio de sentadilla completa (**Tabla 39**) como en el de press de banca (**Tabla 40**). No hubo interacción significativa '*tiempo x grupo*' en ninguna de las variables analizadas durante el test incremental en sentadilla completa. El análisis de las diferencias estandarizadas entre-grupos reveló un *posible* mayor efecto para el grupo  $PV_{menor}$  en comparación con  $PV_{mayor}$  en la variable  $VMP_{CB}$ . Para el resto de comparaciones, las diferencias entre-grupos fueron *no claras*. Para el ejercicio de press de banca, hubo interacción significativa ( $p < 0.05$ ) '*tiempo x grupo*' en las variables  $VMP_{CA}$  y test de fatiga, con el grupo  $PV_{mayor}$  mostrando mayores incrementos ( $p < 0.05$ ) que  $PV_{menor}$  (**Tabla 40**). Además, para las variables  $1RM_{est}$ ,  $VMP_{CC}$  y  $VMP_{CB}$ , el grupo  $PV_{mayor}$  alcanzó *posiblemente* mayores aumentos que  $PV_{menor}$ .

### **Cambios en el salto vertical y la capacidad de aceleración**

El grupo PV10% mostró un aumento significativo del rendimiento en el CMJ ( $p < 0.001$ ) y la capacidad de aceleración ( $p < 0.05$ ), mientras que el grupo PV30% solo resultó en un incremento significativo ( $p < 0.05$ ) en el CMJ (**Tabla 39**). No hubo interacción significativa '*tiempo x grupo*' para ninguna de las tres variables de rendimiento analizadas (CMJ, T10 y T20). El análisis cualitativo de las diferencias entre-grupos mostró un *probable* mayor incremento en las variables CMJ, T10 y T20 para el grupo PV10% comparado con PV30%.

**Tabla 39.** Cambios en las variables de rendimiento analizadas desde el pre-test al post-test para cada grupo de entrenamiento en el ejercicio de **sentadilla completa**.

	PV10%				PV30%				Cambios observados para PV10% vs. PV30%	
	Pre	Post	$\Delta$ (%)	TE	Pre	Post	$\Delta$ (%)	TE	TE entre-grupos (IC 90%)	Probabilidad de un mejor efecto
<b>CMJ</b> (cm)	37.7 $\pm$ 5.6	41.2 $\pm$ 6.1 ***	9.2	0.56	38.4 $\pm$ 5.0	40.6 $\pm$ 6.6 *	5.4	0.40	0.27 (-0.05 to 0.58)	64/35/1 Probable
<b>T10</b> (s)	1.79 $\pm$ 0.07	1.76 $\pm$ 0.08 *	-1.6	0.39	1.75 $\pm$ 0.09	1.76 $\pm$ 0.08	0.7	-0.13	0.48 (0.10 to 0.86)	89/11/0 Probable
<b>T20</b> (s)	3.08 $\pm$ 0.12	3.04 $\pm$ 0.12 *	-1.5	0.36	3.06 $\pm$ 0.15	3.07 $\pm$ 0.14	0.4	-0.06	0.39 (0.06 to 0.71)	83/16/0 Probable
<b>1RM<sub>est</sub></b> (kg)	100.8 $\pm$ 24.6	116.6 $\pm$ 20.7 ***	17.9	0.60	96.6 $\pm$ 14.7	110.5 $\pm$ 15.2 ***	14.9	0.88	0.11 (-0.21 to 0.43)	32/63/6 No claro
<b>VMP<sub>cc</sub></b> (m·s <sup>-1</sup> )	1.00 $\pm$ 0.09	1.11 $\pm$ 0.08 ***	11.8	1.19	0.95 $\pm$ 0.08	1.06 $\pm$ 0.09 ***	11.9	1.33	0.01 (-0.64 to 0.67)	31/39/29 No claro
<b>VMP<sub>cb</sub></b> (m·s <sup>-1</sup> )	1.26 $\pm$ 0.07	1.35 $\pm$ 0.08 ***	7.0	1.16	1.26 $\pm$ 0.06	1.31 $\pm$ 0.09 *	4.2	0.74	0.49 (-0.24 to 1.21)	75/19/6 Posible
<b>VMP<sub>ca</sub></b> (m·s <sup>-1</sup> )	0.74 $\pm$ 0.04	0.88 $\pm$ 0.08 ***	19.3	2.82	0.70 $\pm$ 0.04	0.85 $\pm$ 0.09 ***	20.6	3.37	-0.18 (-1.32 to 0.97)	29/23/49 No claro
<b>Test de fatiga</b>	11.8 $\pm$ 3.1	19.8 $\pm$ 4.9 ***	74.8	2.47	13.9 $\pm$ 5.9	22.1 $\pm$ 4.7 ***	73.2	1.29	0.03 (-0.56 to 0.61)	31/44/26 No claro

TE: Tamaño del efecto;  $\Delta$ : Cambios pre-post entrenamiento; IC: Intervalo de confianza; PV10%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 10% (n = 12); PV30%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 30% (n = 13); 1RM<sub>est</sub>: Una repetición máxima estimada; CMJ: Altura de salto con contramovimiento, T10: Tiempo en recorrer 10 m; T20: Tiempo en recorrer 20 m; VMP<sub>cc</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva con todas las cargas comunes durante el Pre- y el Post-test; VMP<sub>cb</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas iguales o inferiores al ~60% 1RM (VMP  $\geq$  1.00 m·s<sup>-1</sup>) en el pre test; VMP<sub>ca</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas superiores al ~60% 1RM (VMP < 1.00 m·s<sup>-1</sup>) en el pre-test. Diferencias significativas intra-grupo: \* p < 0.05, \*\* p < 0.01, \*\*\* p < 0.001.

**Tabla 40.** Cambios en las variables de rendimiento analizadas desde el pre-test al post-test para cada grupo de entrenamiento en el ejercicio de **press de banca**.

	PV15%				PV40%				Cambios observados para PV40% vs. PV15%	
	Pre	Post	$\Delta$ (%)	TE	Pre	Post	$\Delta$ (%)	TE	TE entre-grupos (IC 90%)	Probabilidad de un mejor efecto
<b>1RM<sub>est</sub></b> (kg)	73.5 ± 19.1	80.2 ± 16.9 ***	10.4	0.32	71.6 ± 12.5	82.0 ± 13.1 ***	15.0	0.79	0.18 (-0.01 a 0.35)	42/58/0 Posible
<b>VMP<sub>cc</sub></b> (m·s <sup>-1</sup> )	0.74 ± 0.10	0.81 ± 0.08 ***	11.5	0.68	0.73 ± 0.05	0.84 ± 0.05 ***	15.4	2.10	0.31 (-0.13 a 0.75)	66/31/3 Posible
<b>VMP<sub>cb</sub></b> (m·s <sup>-1</sup> )	1.07 ± 0.09	1.12 ± 0.07 *	4.4	0.46	1.05 ± 0.06	1.12 ± 0.05 ***	7.3	1.10	0.34 (-0.11 a 0.79)	70/27/3 Posible
<b>VMP<sub>ca</sub></b> (m·s <sup>-1</sup> )	0.47 ± 0.05	0.57 ± 0.07 ***	22.2	1.93	0.49 ± 0.04	0.63 ± 0.04 *** †	28.6	3.32	0.57 (-0.20 a 1.33)	79/19/5 Probable
<b>Test de fatiga</b>	18.3 ± 4.2	20.7 ± 5.0 **	13.8	0.54	21.1 ± 6.8	26.5 ± 6.3 *** †	31.4	0.76	0.45 (0.10 a -0.79)	88/11/0 Probable

TE: Tamaño del efecto;  $\Delta$ : Cambios pre-post entrenamiento; IC: Intervalo de confianza; PV15%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 15% (n = 12); PV40%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 40% (n = 13); 1RM<sub>est</sub>: Una repetición máxima estimada; CMJ: Altura; VMP<sub>cc</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva con todas las cargas comunes durante el Pre- y el Post-test; VMP<sub>cb</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas iguales o inferiores al ~60% 1RM (VMP  $\geq$  0.80 m·s<sup>-1</sup>) en el pre test; VMP<sub>ca</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas superiores al ~60% 1RM (VMP < 0.80 m·s<sup>-1</sup>) en el pre-test. Diferencias significativas intra-grupo: \* p < 0.05, \*\* p < 0.01, \*\*\* p < 0.001. Diferencias significativas entre-grupos: † p < 0.05.

### **Cambios en la curva Carga - Velocidad**

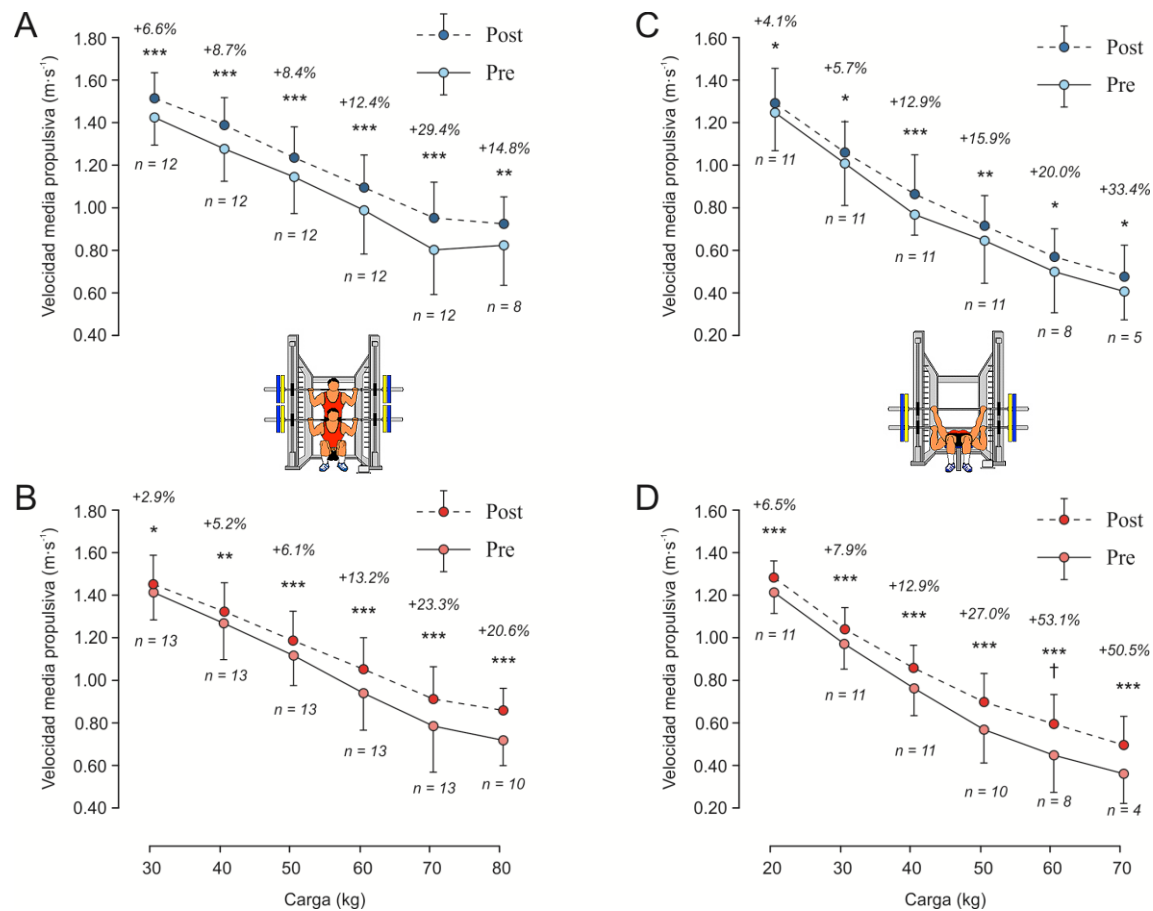
Los cambios en las curvas carga-velocidad para cada grupo experimental en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca aparecen en la **Figura 43**. En el ejercicio de sentadilla completa, el grupo PV10% mostró incrementos significativos en la VMP con todas las cargas analizadas ( $\sim 6 - 34\%$ ;  $p < 0.001$ ), mientras que el grupo PV30% sólo obtuvo mejoras significativas en la VMP ante cargas superiores a 50 kg ( $\sim 4 - 34\%$ ;  $p < 0.05 - 0.001$ ). No hubo interacción significativa '*tiempo x grupo*' para ninguna de las cargas analizadas. El grupo PV10% mostró un *probable* (sobre VSQ<sub>30</sub>) y un *posible* (sobre VSQ<sub>40,50</sub>) mayor incremento que el grupo PV30%. Para el resto de cargas las diferencias entre PV10% y PV30% fueron *no claras*.

Para el ejercicio de press de banca, ambos grupos experimentales (PV15%:  $\sim 4 - 26\%$ ,  $p < 0.05 - 0.01$ ; PV40%:  $\sim 5 - 45\%$ ;  $p < 0.05 - 0.001$ ) mostraron un aumento significativo en la VMP ante las distintas cargas analizadas (20 - 70 kg). Solo hubo interacción '*tiempo x grupo*' en la VMP ante 60 kg, con el grupo PV40% mostrando mayores incrementos en la VMP que PV15%. El análisis de las diferencias estandarizadas entre-grupos indicó que el grupo PV40% mostró un *posible* mayor aumento en VPB<sub>20,30,50,60,70</sub> que PV15%.

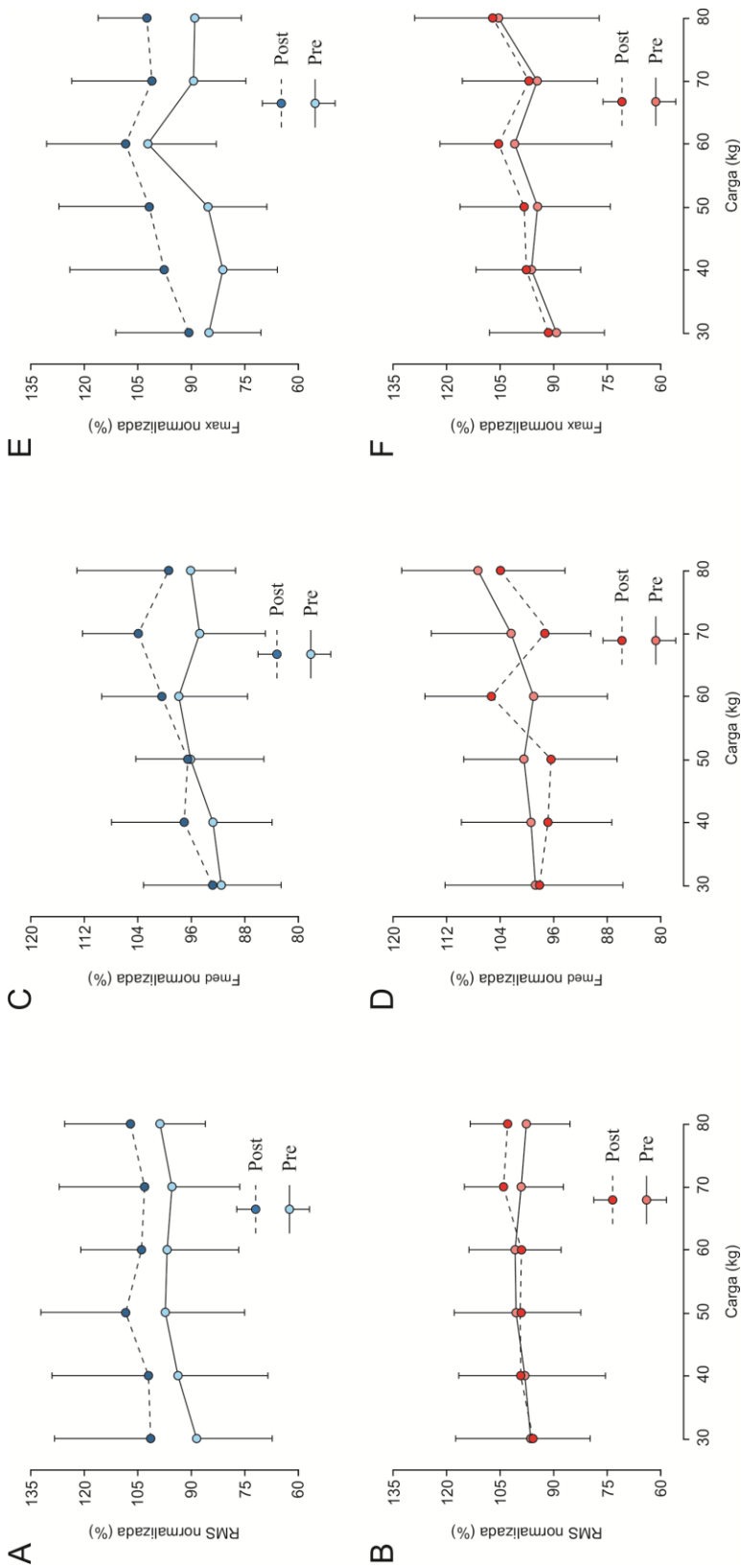
### **Cambios en la curva Carga - EMG**

Los cambios en las variables RMS,  $F_{med}$  y  $F_{max}$  con cada una de las cargas analizadas en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca aparecen en las **Figuras 44 y 45**, respectivamente. No hubo interacción '*tiempo x grupo*' para ninguna de las variables de EMG en ninguna de las cargas estudiadas, ni en el ejercicio de sentadilla completa ni en el de press de banca. Ninguno de los grupos experimentales mostró cambios intra-grupo estadísticamente significativos después del entrenamiento en ninguno de los dos ejercicios evaluados. En el ejercicio de sentadilla completa, el grupo PV10% mostró mayores valores durante el post-test en las tres variables de EMG analizadas (**Figuras 44A, 44C y 44E**). El grupo PV30% solo resultó en un ligero incremento en la  $F_{max}$  (**Figura 44F**), mientras que la RMS y la  $F_{med}$  se mantuvieron prácticamente sin cambios (**Figuras 44B y 44D**).

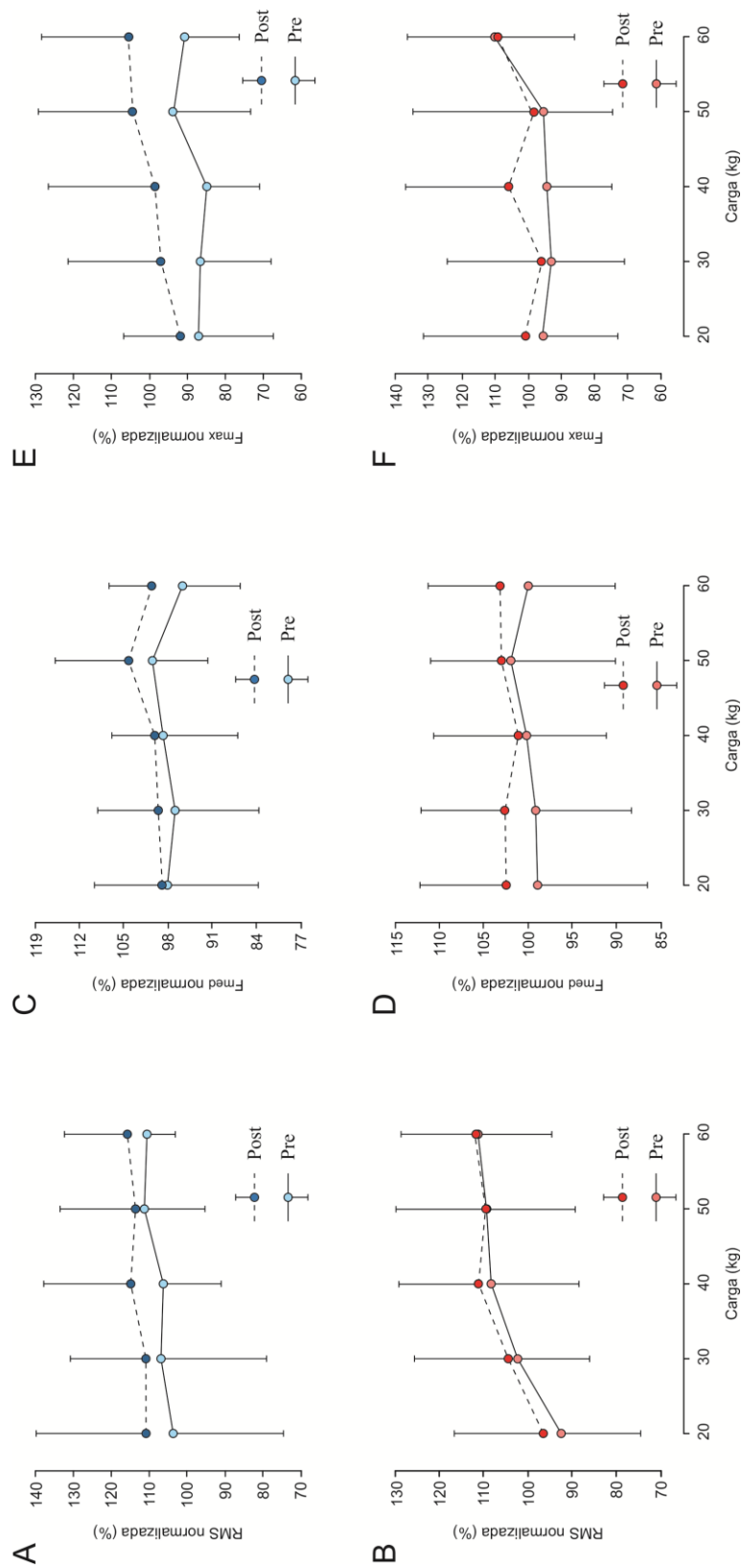
Para el ejercicio de press de banca, ambos grupos mostraron una tendencia clara a obtener mayores valores de RMS (**Figura 45A y 45B**),  $F_{med}$  (**Figuras 45E y 45F**) y  $F_{max}$  (**Figuras 45E y 45F**) después del entrenamiento para todas las cargas.



**Figura 43.** Curva carga-velocidad en el ejercicio de **sentadilla completa** y **press de banca** obtenida para los grupos PV<sub>menor</sub> (**A y C**) y grupos PV<sub>mayor</sub> (**B y D**) antes y después de las 8 semanas de entrenamiento. Las barras de error representan la DT. Diferencias estadísticamente significativas intra-grupo: \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*\*\*  $p < 0.001$ . Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV10%: †  $p < 0.05$ .



**Figura 44.** Cambios en la RMS (**A** y **B**), la Fmed (**C** y **D**) y la Fmax (**E** y **F**) ante distintas cargas absolutas (20 - 60 kg) en el ejercicio de sentadilla completa para los grupos PV10% (**Azul**) y PV30% (**Rojo**). Las líneas verticales representan la DT.



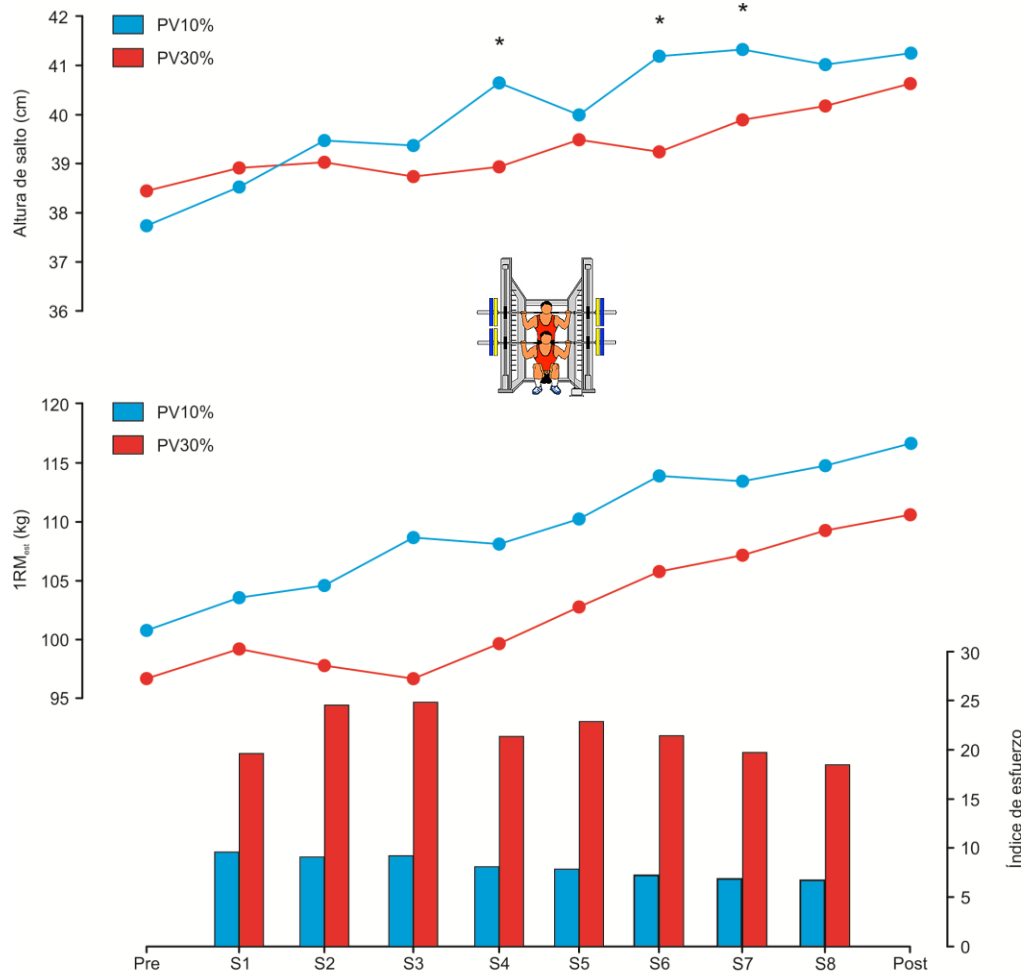
**Figura 45.** Cambios en la RMS (A y B), la Fmed (C y D) y la Fmax (E y F) ante distintas cargas absolutas (20 - 60 kg) en el ejercicio de **press de banca** para los grupos PV15% (Azul) y PV40% (Rojo). Las líneas verticales representan la DT.

**Evolución de la  $1RM_{est}$  y el CMJ durante el ciclo de entrenamiento**

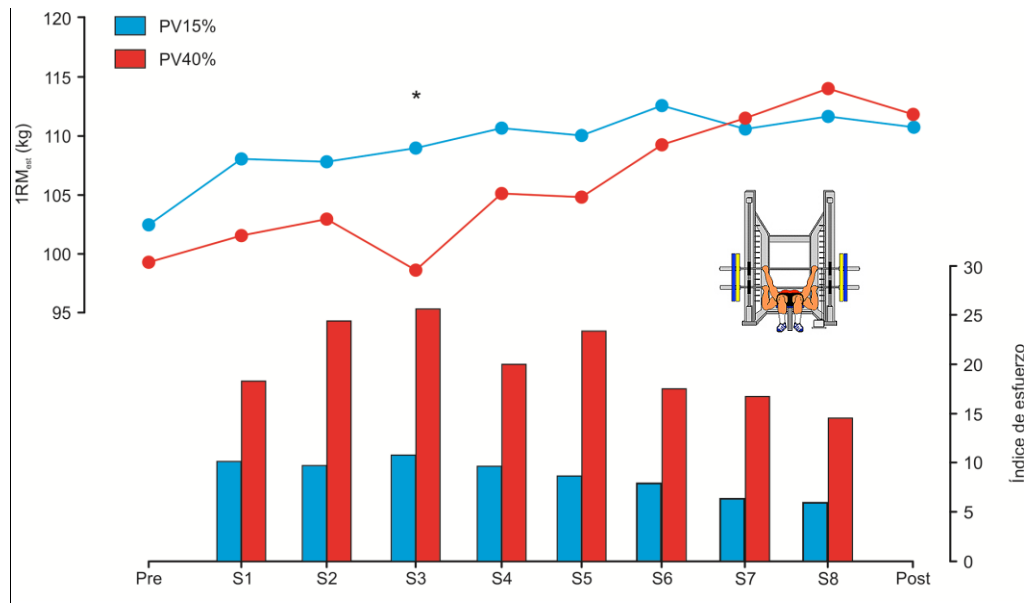
En la **Figura 46** aparece la evolución de la  $1RM_{est}$  y del CMJ durante todo el ciclo de entrenamiento junto con el *índice de esfuerzo* medio de cada semana realizado por cada grupo de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla completa. No hubo interacción '*tiempo x grupo*' en ninguna de las dos variables. En el CMJ, el grupo PV10% mostró incrementos significativo (8.0%;  $p < 0.01$ ) con respecto a los valores del pre-test a partir de la cuarta semana (S4) de entrenamiento, mientras que el grupo PV30% solo mostró cambios significativos entre el pre- y el post-test. En cuanto a la  $1RM_{est}$  en el ejercicio de sentadilla completa, el grupo PV10% mostró incrementos significativos (11.1%;  $p < 0.05$ ) con respecto a los valores iniciales a partir de la semana cinco (S5) de entrenamiento, mientras que el grupo PV30% no alcanzó cambios significativos hasta la séptima semana (S7: 10.9%;  $p < 0.05$ ).

Los cambios semanales en la  $1RM_{est}$  en el ejercicio de press de banca para cada grupo experimental están representados en la **Figura 47**. No hubo interacción '*tiempo x grupo*' en la evolución de la  $1RM_{est}$  durante el ejercicio de press de banca. El grupo PV15% mostró aumentos significativos ( $p < 0.05$ ) de la  $1RM_{est}$  desde la primera semana de entrenamiento. Los valores de 1RM fueron incrementando progresivamente hasta la semana 6 (S6) donde el porcentaje de cambio se estabilizó (~12%;  $p < 0.001$ ). El grupo PV40% obtuvo cambios significativos ( $p < 0.001$ ) con respecto al pre-test a partir de la cuarta semana.





**Figura 46.** Evolución de la altura de salto y de la repetición máxima (estimada a partir de la mejor velocidad alcanzada con la carga más alta utilizada en la segunda sesión de cada semana de entrenamiento) en el ejercicio de **sentadilla completa** obtenida para los grupos PV10% (azul) y PV30% (rojo). Las barras representan el *índice de esfuerzo* medio de cada semana para cada grupo de entrenamiento. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV30%: \*  $p < 0.05$ .



**Figura 47.** Evolución de la repetición máxima (estimada a partir de la mejor velocidad alcanzada con la carga más alta utilizada en la segunda sesión de cada semana de entrenamiento) en el ejercicio de **press de banca** obtenida para los grupos PV15% (azul) y PV40% (rojo). Las barras representan el *índice de esfuerzo* medio de cada semana para cada grupo de entrenamiento. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV30%: \*  $p < 0.05$ .

### Cambios bioquímicos

No hubo interacción significativa '*tiempo x grupo*' para ninguna de las hormonas ni marcadores bioquímicos analizados (**Tabla 41**). Ambos grupos experimentales, PV<sub>menor</sub> ( $p < 0.05$ ) y PV<sub>mayor</sub> ( $p < 0.001$ ), solo mostraron cambios significativos en la proteína TnT. La comparación entre-grupos reveló que el incremento en la proteína TnT fue significativamente mayor ( $p < 0.05$ ) para el grupo PV<sub>mayor</sub> que para PV<sub>menor</sub> (**Tabla 41**).

**Tabla 41.** Cambios en las variables bioquímicas analizadas desde el pre-test al post-test para cada grupo de entrenamiento.

	PV <sub>menor</sub>			PV <sub>mayor</sub>		
	Pre	Post	Δ (%)	Pre	Post	Δ (%)
<b>Prolactina</b> (ng·L <sup>-1</sup> )	10.8 ± 4.8	12.4 ± 4.5	18.8	12.8 ± 3.7	13.5 ± 4.6	11.5
<b>GH</b> (ng·L <sup>-1</sup> )	1.44 ± 1.80	0.92 ± 1.96	-23.7	0.61 ± 0.55	0.69 ± 0.88	31.0
<b>IGF-1</b> (ng·L <sup>-1</sup> )	256.0 ± 75.5	261.4 ± 87.1	1.5	279.5 ± 106.7	282.7 ± 101.0	3.8
<b>Cortisol</b> (mmol·L <sup>-1</sup> )	413.5 ± 197.8	417.9 ± 219.3	1.5	387.7 ± 179.1	396.2 ± 159.4	8.2
<b>Testosterona</b> (mmol·L <sup>-1</sup> )	19.3 ± 8.4	20.8 ± 7.6	11.9	19.1 ± 4.1	17.8 ± 5.2	-4.3
<b>Cociente T/C</b>	0.052 ± 0.041	0.056 ± 0.040	8.8	0.063 ± 0.036	0.054 ± 0.029	-5.3
<b>Troponina T</b> (ng·L <sup>-1</sup> )	4.4 ± 1.9	6.9 ± 3.0 *	76.6	3.4 ± 1.2	7.9 ± 2.6 ***†	146.3

Δ: Cambios pre-post entrenamiento; PV<sub>menor</sub>: Grupo que entrenó con una menor pérdida de velocidad en la serie (n = 12); PV<sub>mayor</sub>: Grupo que entrenó con una mayor pérdida de velocidad en la serie (n = 13); Diferencias significativas intra-grupo: \* p < 0.05, \*\*\* p < 0.001. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV<sub>menor</sub>: † p < 0.05.

## Eficiencia

El cálculo del número de repeticiones que ha necesitado realizar cada grupo para obtener un aumento del 1% en las diferentes variables analizadas mostró que la eficiencia del entrenamiento fue superior en el grupo PV<sub>menor</sub> que en el grupo PV<sub>mayor</sub> para todas las variables, excepto para el test de fatiga en el ejercicio de press de banca (Tabla 42).

**Tabla 42.** Eficiencia del entrenamiento para cada grupo experimental en los ejercicios de **sentadilla completa** y **press de banca**.

Variable	SQ		PB	
	PV10%	PV30%	PV15%	PV40%
<b>CMJ</b>	11.9	42.5		
<b>T10</b>	68.5	327.7		
<b>T20</b>	73.1	573.5		
<b>1RM<sub>est</sub></b>	6.1	15.4	11.0	14.6
<b>VMP<sub>CC</sub></b>	9.3	19.3	10.0	14.2
<b>VMP<sub>CB</sub></b>	15.7	54.6	26.1	30.0
<b>VMP<sub>CA</sub></b>	5.7	11.1	5.2	7.7
<b>Test de Fatiga</b>	1.5	3.1	8.3	7.0

La eficiencia indica el número de repeticiones que ha necesitado realizar cada grupo para obtener una unidad de mejora (1%) en las variables analizadas. SQ: Sentadilla completa; PB: Press de banca; PV10%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 10% (n = 12) en el ejercicio de **sentadilla completa**; PV30%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 30% (n = 13) en el ejercicio de **sentadilla completa**; PV15%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en

la serie del 15% (n = 12) en el ejercicio de **press de banca**; PV40%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 40% (n = 13) en el ejercicio de **press de banca**; 1RM<sub>est</sub>: Una repetición máxima estimada; CMJ: Altura de salto con contramovimiento. T10: Tiempo en recorrer 10 m; T20: Tiempo en recorrer 20 m; VMP<sub>CC</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva con todas las cargas comunes durante el Pre- y el Post-test; VMP<sub>CB</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas iguales o inferiores al ~60% 1RM en el pre test; VMP<sub>CA</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas superiores al ~60% 1RM en el pre-test.

### 6.4.3. Discusión

El objetivo del presente estudio fue analizar el efecto de dos magnitudes de pérdida de velocidad dentro de la serie (10% y 30% en el ejercicio de sentadilla completa; 15% y 40% en el ejercicio de press de banca) ante las mismas intensidades relativas (70 - 85% 1RM) sobre los cambios en el rendimiento neuromuscular y el efecto crónico hormonal. Nuestros resultados mostraron que realizar un entrenamiento de sentadilla completa alcanzando una pérdida de velocidad en la serie del 10% produjo similares o superiores, según las variables analizada, ganancias sobre la fuerza y la resistencia muscular y sobre el rendimiento físico en acciones de alta velocidad (CMJ y sprint) que entrenar alcanzando un 30% de pérdida de velocidad en cada serie de entrenamiento. Esas mejoras fueron acompañadas por un mayor aumento de la actividad eléctrica muscular. Sin embargo, en el ejercicio de press de banca, parece que alcanzar una pérdida de velocidad del 40% en cada serie de entrenamiento es más favorable para la mejora de la fuerza y la resistencia muscular que alcanzar una pérdida de velocidad del 15%. Además, entrenar con una mayor pérdida de velocidad en la serie produjo un mayor daño muscular y un peor balance anabólico-catabólico. Por tanto, en concordancia con investigaciones previas (Pareja-Blanco et al., 2016b; Pareja-Blanco, Sánchez-Medina, Suarez-Arrones, & González-Badillo, 2016c), los resultados de nuestro estudio parecen indicar que el grado de fatiga inducido en cada serie de entrenamiento (cuantificado a través de la pérdida de velocidad en la serie) es un factor determinante para modular las adaptaciones neuromusculares que se producen durante el entrenamiento de fuerza.

Uno de los aspectos importantes de este estudio fue el control de la velocidad de ejecución en cada una de las repeticiones de entrenamiento de todos los participantes. La medición directa de la velocidad permitió ajustar la intensidad relativa de entrenamiento en cada sesión para cada participante a través de la velocidad de la primera repetición de la primera serie de entrenamiento (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2017), y controlar la magnitud de pérdida de velocidad en cada serie (Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). De este modo, es razonable aceptar que la única diferencia entre ambos protocolos de entrenamiento fue el grado de pérdida de velocidad alcanzado en cada serie. Esta precisión a la hora de conocer la *carga global* de entrenamiento nos permite analizar la posible relación causa-efecto entre el entrenamiento realizado y los cambios en las distintas variables analizadas. Hasta la fecha, la intensidad relativa de entrenamiento se había cuantificado

a través del porcentaje de 1RM o la realización de XRM, y el volumen mediante el número de repeticiones por serie. Sin embargo, estas formas de programar el entrenamiento presentan importantes limitaciones (ver apartado **3.1.Componentes que definen la carga de entrenamiento de fuerza**) que hacen que se produzcan desajustes importantes entre la *carga programada* y la *carga realizada*, y que imposibilitan, por tanto, que podamos conocer el entrenamiento *real* realizado. Esta falta de control de las variables fundamentales del entrenamiento (intensidad y volumen) impide conocer cuál ha sido el estímulo de entrenamiento causante de los cambios producidos en el rendimiento después de un periodo de intervención, y dificultan en gran medida el avance del conocimiento sobre la posible relación carga-rendimiento durante el entrenamiento de fuerza. Estas limitaciones pueden ser superadas mediante el control de la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad en cada serie de entrenamiento (González-Badillo, et al., 2011; Pareja-Blanco, et al., 2016b; Pareja-Blanco, et al., 2016c; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011).

### ***Cambios en la fuerza y la resistencia muscular y el rendimiento en CMJ y sprint después del entrenamiento de sentadilla completa***

Después de 8 semanas de entrenamiento, ambos grupos experimentales mostraron mejoras significativas en las variables  $1RM_{est}$ ,  $VMP_{CC}$ ,  $VMP_{CB}$ ,  $VMP_{CA}$ , el test de fatiga y la VMP ante distintas cargas absolutas (**Tabla 39 y Figura 43A y 43B**). Aunque no hubo diferencias significativas entre-grupos, el grupo PV10% mostró un mayor porcentaje de cambio y mayor TE intra- y entre-grupos que el grupo PV30%, principalmente en la VMP ante cargas bajas ( $VMP_{CB}$ ,  $VSQ_{30}$  y  $VSQ_{40}$ ). Es importante destacar que estos cambios se produjeron a pesar de que el grupo PV10% realizó, como media, menos de la mitad (47.8%) de las repeticiones que el grupo PV30% ( $109.6 \pm 12.0$  vs.  $228.0 \pm 76.6$  repeticiones para PV10% y PV30%, respectivamente (**Figura 42A**). Esto resultó especialmente relevante en la mejora del test de fatiga muscular, ya que, supuestamente, la realización de un mayor número de repeticiones durante el entrenamiento debería resultar en un mayor incremento de la resistencia muscular (Bird, et al., 2005; Ratamess et al., 2009; Schott, McCully, & Rutherford, 1995). Sin embargo, el porcentaje de mejora en ambos grupo fue prácticamente el mismo (PV10%: 74.8%; PV30%: 73.2%). Otros estudios en los que se compararon protocolos de entrenamiento

de fuerza con distinto número de repeticiones por serie tampoco mostraron diferencias en la mejora de la resistencia muscular (Anderson & Kearney, 1982; Stone & Coulter, 1994). Por tanto, contrario a lo que indican algunas revisiones (Bird, et al., 2005; Ratamess, et al., 2009; Schott, et al., 1995), parece que la mejora de la resistencia muscular no depende directamente del volumen realizado durante el entrenamiento. En ese sentido, nuestros resultados sugieren que la mejora de la resistencia depende, al menos parcialmente, del incremento de la fuerza máxima (1RM), ya que se encontró una correlación lineal positiva significativa ( $r = 0.63$ ;  $p < 0.05$ ) entre los cambios en el número de repeticiones ante la misma carga absoluta y los cambios en la  $1RM_{est}$ . La posible explicación de esta relación significativa se basa en el hecho de que, cuando se mejora la 1RM, la misma carga absoluta pasa a representar un porcentaje de la 1RM menor, es decir, un menor grado de esfuerzo o intensidad relativa en la primera repetición de la serie post-entrenamiento. Por tanto, el número de repeticiones que se puede realizar ante esa misma carga absoluta es mayor.

Tradicionalmente, se ha pensado que, para maximizar las ganancias de fuerza, el entrenamiento de fuerza debía realizarse completando el máximo número de repeticiones posibles en cada serie, es decir, hasta el fallo muscular (Delorme, 1945; Fisher, Steele, Bruce-Low, & Smith, 2011; Kraemer et al., 2002; Kraemer & Fleck, 1988; Kraemer & Ratamess, 2004; Ratamess, et al., 2009). Esta afirmación se basa en que el entrenamiento alcanzando el fallo muscular proporciona un mayor estímulo para el reclutamiento de unidades motoras de mayor umbral de reclutamiento, por tanto, hace que se reclute un mayor número de unidades motoras y mayor número de fibras, lo que provoca un mayor aumento de la fuerza y la hipertrofia muscular (Fisher, et al., 2011; Willardson, 2007). En línea con esta argumentación, en algunos estudios (Drinkwater et al., 2005; Rooney, Herbert, & Balnave, 1994; Schott, et al., 1995) se ha encontrado que el entrenamiento permitiendo el fallo muscular proporcionó mayores ganancias de fuerza que un entrenamiento sin llegar al fallo muscular. Sin embargo, en estos estudios (Drinkwater, et al., 2005; Rooney, et al., 1994; Schott, et al., 1995) no se controló la velocidad de ejecución voluntaria, la cual es un factor importante para determinar el grado de exigencia real del entrenamiento e influye directamente sobre los efectos producidos por el entrenamiento (González-Badillo, et al., 2014; Pareja-Blanco, et al., 2014). En este sentido, estudios más recientes (Folland, Irish, Roberts, Tarr, & Jones, 2002; González-Badillo, et al., 2005; González-Badillo, et al., 2006; Izquierdo et al.,

2006; Pareja-Blanco, et al., 2016b; Sampson & Groeller, 2016) han permitido comprobar que no es necesario realizar repeticiones hasta el fallo muscular para obtener mayores ganancias de fuerza. A pesar de estos hallazgos, en la mayoría de estos estudios se comparó realizar un entrenamiento hasta el fallo vs. no fallo (normalmente realizar la mitad de las repeticiones posibles), pero aun no se ha analizado el efecto de manipular el número de repeticiones realizado en función de las que se podrían completar ante una carga determinada, controlado éste a través de la pérdida de velocidad en la serie, y que ninguno de los grupos de entrenamiento realice repeticiones hasta el fallo muscular. Por tanto, una vez conocido que no es necesario realizar repeticiones hasta el fallo muscular para obtener los mayores beneficios sobre la fuerza, los resultados de nuestro estudio nos permiten acercarnos un poco más al conocimiento de qué volumen de entrenamiento es el que produce mayores ganancias sobre el rendimiento neuromuscular ante un determinado rango de intensidades.

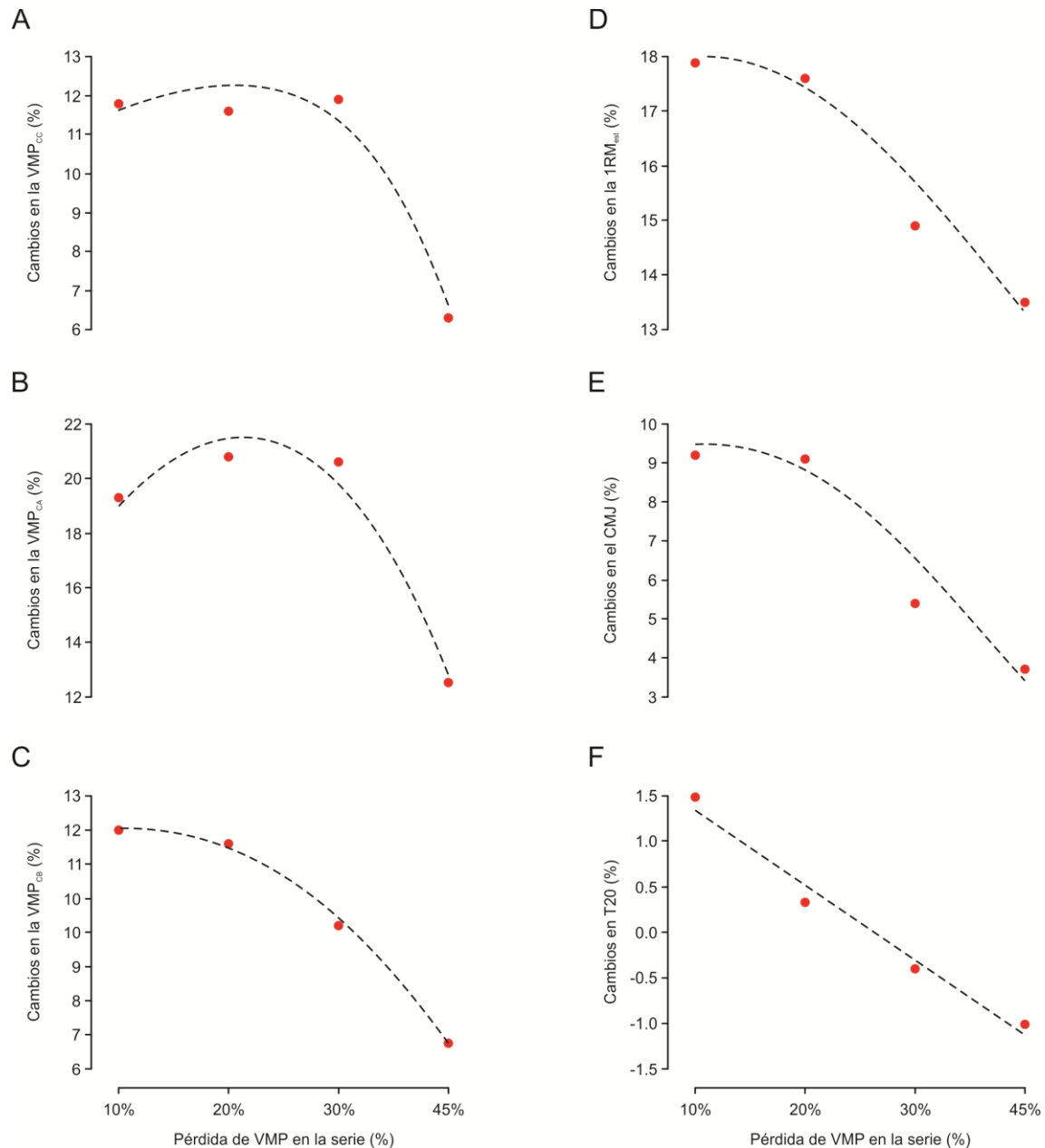
De todos los estudios mencionados anteriormente en los que se comparó entrenar hasta el fallo con no entrenar hasta el fallo muscular, solo en el realizado por Pareja-Blanco et al. (2016b) se midió en el ejercicio de sentadilla completa la velocidad de ejecución en todas las repeticiones de entrenamiento para controlar la intensidad y el volumen de manera objetiva. La principal conclusión de este estudio fue que realizar repeticiones hasta alcanzar un pérdida de velocidad en la serie del 20% (lo cual supone realizar aproximadamente la mitad de las repeticiones posibles en la serie) produjo similares o mayores, según las variables, ganancias de fuerza que realizar repeticiones hasta alcanzar un 40-45% de pérdida de velocidad en cada serie (lo que supone llegar al fallo o casi al fallo muscular), a pesar de que el grupo de mayor pérdida de velocidad en la serie mostró un mayor incremento del volumen muscular (hipertrofia). Nuestro estudio supone, por tanto, una continuación al realizado por Pareja-Blanco et al. (2016b), ya que se analiza el efecto de dos magnitudes de pérdida de velocidad distintas (10% vs. 30%) a las analizadas previamente (20% vs. 40-45%) ante las mismas intensidades relativas (70 - 85% 1RM). Así, tomando los resultados de ambos estudios de manera conjunta, es posible concluir, que realizar incluso menos de la mitad de las repeticiones posibles (~35%;  $109.6 \pm 12.0$  vs.  $310.5 \pm 42.0$  para PV10% y PV45%, respectivamente) ante intensidades que oscilan entre el 70 y 85% 1RM es suficiente para inducir importantes mejoras en la fuerza y la resistencia muscular. De hecho, el porcentaje de cambio obtenido para cada una de las variables medidas durante el test incremental de sentadilla



completa fue muy similar entre el grupo que alcanzó una pérdida de velocidad del 10% en el presente estudio (7.0 - 19.3%) en comparación con el grupo que alcanzó una pérdida de velocidad del 20% (6.6 - 20.8%) en el estudio de Pareja-Blanco et al. (2016b), lo cual supone una mayor eficiencia para el grupo PV10%, ya que necesitó realizar un menor número de repeticiones ( $109.6 \pm 12.0$  repeticiones) que el grupo PV20% ( $185.9 \pm 22.0$  repeticiones) para obtener las mismas ganancias de fuerza. Por tanto, en base a los resultados de ambos estudios, parece que, como se ha especulado en estudios previos (González-Badillo, et al., 2005; González-Badillo, et al., 2006; Kuipers, 1996), existe una relación curvilínea entre el volumen de entrenamiento y la mejora de la fuerza. Aunque no se han analizado todas las pérdidas de velocidad posibles ante las mismas intensidades relativas, los resultados de nuestro estudio y los de Pareja-Blanco et al. (2016b) sugieren que realizar repeticiones hasta alcanzar un 10 - 20% de pérdida de velocidad en la serie produce aumentos significativos en la fuerza, la resistencia muscular y la velocidad ante distintas cargas absolutas, mientras que el porcentaje de cambio disminuye progresivamente a medida que se supera la mitad de las repeticiones posibles en la serie (**Figura 48**).

En cuanto al salto vertical y la capacidad de aceleración, el grupo PV10% mostró una mejora significativa en el CMJ, T10 y T20, y estos porcentajes de cambio fueron *probablemente* mayores que los alcanzados por el grupo PV30%. Los resultados obtenidos podrían estar relacionados con el principio de especificidad. Aunque el número de repeticiones realizado a alta velocidad ( $> 0.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) fue similar para ambos grupos (**Figura 42A**), el hecho de que PV30% hiciera un mayor número de repeticiones a velocidades inferiores hizo que la velocidad media total de entrenamiento fuera significativamente menor en PV30% ( $0.63 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) que en PV10% ( $0.70 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) (**Figura 41**). Estas diferencias en la velocidad media absoluta de entrenamiento ( $\sim 0.07 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), aunque podrían ser consideradas como pequeñas, parecen ser determinantes para las adaptaciones producidas sobre acciones de alta velocidad como el salto vertical y la capacidad de aceleración. Estos resultados están en relación con estudios previos (Mora-Custodio, et al., 2016; Pareja-Blanco, et al., 2014; Pareja-Blanco, et al., 2016b; Pareja-Blanco, et al., 2016c) en los que se pone de manifiesto la importancia de la velocidad absoluta de entrenamiento para las adaptaciones neuromusculares.

Al igual que ocurre con las ganancias de fuerza, los cambios en el CMJ después de un entrenamiento de fuerza ante las mismas intensidades relativas también guarda una relación con tendencia curvilínea con el volumen de entrenamiento (**Figura 48E**), observándose una meseta con pérdidas del 10 y el 20% de la velocidad en la serie para descender claramente el efecto positivo con pérdidas de velocidad superiores. Así, las mayores ganancias se producen con una pérdida de velocidad en la serie del 10% (9.2%) y el 20% (9.1%), mientras que mayores pérdidas de velocidad en la serie resultaron en progresivamente menores porcentajes de mejora (PV30%: 5.4%; PV45%: 3.7%). A diferencia del resto de variables estudiadas, parece que la relación entre las ganancias en el T20 y el volumen de entrenamiento es lineal. El mayor porcentaje de cambio (-1.5%) se produjo con una pérdida de velocidad en la serie del 10%, y a medida que aumentó el porcentaje de pérdida de velocidad en la serie, la ganancia de rendimiento disminuyó, llegando a mostrar una tendencia a producir un efecto negativo cuando las pérdidas de velocidad en la serie fueron superiores al 20% (**Figura 48F**). Estos resultados parecen indicar que el efecto negativo de un mayor grado de fatiga durante las series de entrenamiento sobre el rendimiento se manifiesta en mayor medida cuanto mayor es la velocidad a la que se realiza la acción sobre la cual se mide el rendimiento. Por este motivo, sería conveniente determinar un límite de pérdida de velocidad en la serie durante el entrenamiento de fuerza como una estrategia para evitar realizar repeticiones innecesarias, lentas y fatigantes que podrían ser contraproducentes para obtener adaptaciones relacionadas con la rápida producción de fuerza requerida en muchos deportes y disciplinas deportivas.



**Figura 48.** Relación entre la pérdida de velocidad en la serie y el porcentaje de cambio obtenido en las diferentes variables analizadas en el ejercicio de **sentadilla completa**. Para estas relaciones se han utilizado los resultados del presente estudio y los resultados mostrados por Pareja-Blanco et al. (2016b)

El incremento de la fuerza y del rendimiento después de un periodo de entrenamiento está determinado, entre otros factores, por diferentes adaptaciones neurales, principalmente durante las primeras semanas de entrenamiento (Aagaard, 2003; Folland & Williams, 2007; Sale, 1988, 1992). En el presente estudio, aunque no se encontraron cambios significativos para ninguno de los dos grupos experimentales en las variables de EMG analizadas, el grupo PV10% resultó en mayores valores de RMS (**Figura 44A**),  $F_{med}$  (**Figura 44C**) y  $F_{max}$  (**Figura 44E**) ante todas las cargas evaluadas (30 - 80kg)

después de las 8 semanas de entrenamiento, mientras que el grupo PV30% solo mostró un ligero incremento en la  $F_{\max}$  (**Figura 44F**). De acuerdo con los resultados alcanzados por el grupo PV10%, en estudios previos también se han mostrado aumentos en la amplitud de la EMG (RMS o iEMG) medida durante la 1RM (Buckthorpe, Erskine, Fletcher, & Folland, 2015; Hakkinen et al., 2001; Jenkins et al., 2016; Sampson & Groeller, 2016) o durante una contracción voluntaria máxima (Aagaard, Simonsen, Andersen, Magnusson, & Dyhre-Poulsen, 2002; Hakkinen et al., 1998; Hakkinen, Kraemer, Newton, & Alen, 2001; Ullrich et al., 2015; Ullrich, Pelzer, Oliveira, & Pfeiffer, 2016), junto con un aumento paralelo de la fuerza medida durante dicha contracción, después de un periodo de entrenamiento de fuerza. Sin embargo, para nuestro conocimiento, este es el primer estudio en el que se analiza el cambio en distintas variables de EMG ante distintas cargas absolutas. Dado que la velocidad ante una carga absoluta depende directamente de la fuerza aplicada (González-Badillo & Ribas, 2002), es razonable asumir que el incremento de la velocidad ante una misma carga absoluta se debe a un aumento de la fuerza aplicada. Por tanto, este mayor nivel de activación mostrado por el grupo PV10% podría explicar, al menos en parte, el incremento de la VMP ante las distintas cargas absolutas evaluadas. Este factor ha podido también influir en la mejora del CMJ y la capacidad de aceleración.

Por otro lado, el grupo PV30% también mostró cambios significativos en la VMP ante las distintas cargas analizadas, sin embargo, no presentó cambios en las variables de EMG. Aunque los cambios en la fuerza vienen acompañados habitualmente de un aumento de la amplitud de la señal de EMG (Colson, Pousson, Martin, & Van Hoecke, 1999; McBride, Blaak, & Triplett-McBride, 2003; Pousson, Amiridis, Cometti, & Van Hoecke, 1999), también existen algunos estudios en los que no se han mostrado cambios en la EMG de la musculatura agonista después de completar un programa de entrenamiento de fuerza a pesar de los incrementos en la fuerza (Ferri et al., 2003; Keen, Yue, & Enoka, 1994). Estas discrepancias pueden estar relacionadas con la influencia de otras adaptaciones neuromusculares, tales como cambios en la excitabilidad de las fibras musculares o la amplitud de los potenciales de acción de las fibras (Cannon, Kay, Tarpenning, & Marino, 2007). Es probable también que los diferentes programas de entrenamiento (PV10% vs. PV30%) hayan derivado en respuestas adaptativas diferentes y que los cambios en uno y otro grupo, aunque fueron semejantes en cuanto a mejora de la fuerza, se debieron a factores distintos. Existen

algunos estudios previos que soportan la noción de que entrenar con altas intensidades y volúmenes produce mayor grado de hipertrofia muscular (Campos et al., 2002; Pareja-Blanco, et al., 2016b), mientras que entrenar con cargas bajas o bajo volumen de entrenamiento produce un mayor descenso en el umbral de activación de las unidades motoras y un incremento en la frecuencia de disparo de las unidades motoras activas (Van Cutsem & Duchateau, 2005; Van Cutsem, Duchateau, & Hainaut, 1998). Por tanto, los resultados de nuestro estudio parecen estar de acuerdo con estos estudios y sugieren que las mejoras en el grupo PV10% se han debido, probablemente, a adaptaciones relacionadas con el reclutamiento y la frecuencia de disparo de las motoneuronas y a alteraciones en la sincronización del disparo de las unidades motoras (Aagaard, 2003; Gruber & Gollhofer, 2004), ya que es poco probable que este tipo de entrenamiento caracterizado por un bajo volumen haya podido inducir hipertrofia muscular (Pareja-Blanco, et al., 2016b). Por el contrario, la falta de cambio en las variables de EMG junto con el incremento de la concentración basal de hormonas relacionadas con la remodelación tisular sugieren que los cambios en la fuerza experimentados por el grupo PV30% han podido estar relacionados con transformaciones en la estructura muscular (aumento de la sección transversal del músculo). De hecho, aunque en este estudio no se hayan analizado los cambios en el tipo y la proporción de las fibras musculares, se ha mostrado que realizar entrenamientos hasta el fallo o casi al fallo muscular produce un aumento del volumen muscular junto con un descenso significativo en el porcentaje de fibras tipo IIX (Andersen et al., 2005; Pareja-Blanco, et al., 2016b), mientras que realizar aproximadamente la mitad de las repeticiones posibles (es decir, alcanzar una pérdida de velocidad en la serie del 20%) no produjo cambios sobre el porcentaje de tipo de fibras (Pareja-Blanco, et al., 2016b). Dado que realizar series con una pérdida de velocidad del 10% produce menos fatiga que con el 20% (ver resultados del **Estudio II**), es razonable admitir que el grupo PV10% no mostró descensos en el porcentaje de fibras tipo IIX. Sin embargo, es probable que alcanzar pérdidas de velocidad en la serie del 30% suponga un grado de estrés lo suficientemente elevado como para producir un mayor grado de hipertrofia y transformaciones de fibras hacia isoformas más lentas. Por tanto, estos resultados, junto con el mayor incremento de la proteína TnT, sugieren que el menor incremento de la VMP ante distintas cargas, el salto vertical y la capacidad de aceleración mostrado por el grupo PV30% podría deberse a un excesivo grado de fatiga

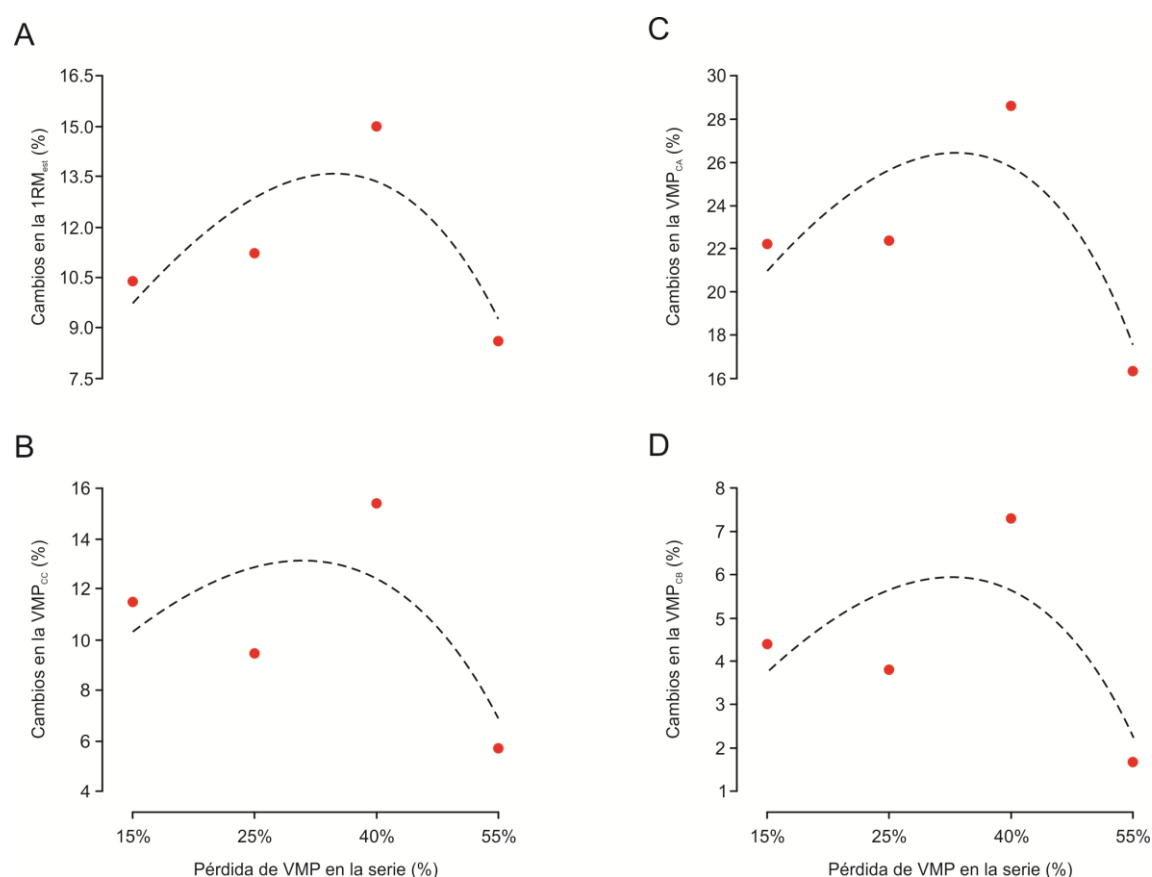
acumulado durante las sesiones de entrenamiento al realizar series de entrenamiento alcanzando una pérdida de velocidad del 30%.

En el **Estudio II** de la presente Tesis y en otros estudios recientes (González-Badillo et al., 2016; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco et al., 2016a; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) se ha mostrado que realizar entrenamiento con un 30% de pérdida de velocidad en cada serie produce una pérdida considerable de rendimiento, un empeoramiento de las funciones neurales y un aumento significativo de la concentración sanguínea de hormonas catabólicas, lactato y amonio, lo cual indica una mayor degradación de los nucleótidos de purina (Gorostiaga et al., 2012; Gorostiaga et al., 2014; Gorostiaga et al., 2010; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011). Estos factores están relacionados con un descenso de la capacidad de alcanzar altos picos de fuerza y, sobre todo, de RFD (Allen, et al., 2008; Enoka et al., 2011; Jones, 2010; Westerblad, Bruton, & Katz, 2010). Por el contrario, alcanzar valores de pérdida de velocidad en la serie del 10% induce un menor estrés mecánico y metabólico (ver resultados del **Estudio II**) y permite alcanzar mayores valores como término medio de fuerza y velocidad en cada repetición, lo cual puede ser beneficioso para la mejora de acciones de alta velocidad como el salto y la velocidad (Cronin, McNair, & Marshall, 2002, 2003; Mora-Custodio, et al., 2016; Seitz, Reyes, Tran, Saez de Villarreal, & Haff, 2014).

### ***Cambios en la fuerza y la resistencia muscular después del entrenamiento de press de banca***

Ambos grupos experimentales mostraron incrementos significativos en todas las variables medidas durante el test de press de banca. Sin embargo, a diferencia de los resultados encontrados en el ejercicio de sentadilla completa, los cambios en la fuerza y la resistencia muscular en el ejercicio de press de banca fueron porcentualmente mayores en el grupo PV40% que en el PV15%. En este caso, la realización de un mayor número de repeticiones totales ( $114.7 \pm 8.7$  vs.  $219.2 \pm 32.4$  para PV15% y PV40%, respectivamente), mayor número de repeticiones a velocidades inferiores a  $0.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (**Figura 42B**) y menor velocidad media de entrenamiento (**Figura 41**) tuvo un efecto positivo para la mejora del rendimiento en el ejercicio de press de banca. De acuerdo con nuestros resultados, en estudio previos (Drinkwater, et al., 2005; Izquierdo, et al.,

2006) también se ha encontrado que entrenar con un grado de fatiga máximo o casi máximo dentro de la serie (mayor número de repeticiones por serie) produce mayores ganancias sobre la 1RM y la resistencia muscular en el ejercicio de press de banca que entrenar realizando aproximadamente la mitad de las repeticiones posibles en cada serie. Sin embargo, en el único estudio en el que se controló y se cuantificó el volumen de entrenamiento durante el ejercicio de press de banca a través de la pérdida de velocidad en la serie se observaron resultados contrarios (*Datos de laboratorio sin publicar*). En este estudio se comparó el efecto de dos protocolos de entrenamiento de fuerza con las mismas intensidades relativas (70 - 85% 1RM) que diferían solamente en el porcentaje de pérdida de velocidad en la serie: 25% vs. 55%. Aunque no hubo diferencias significativas entre ambos grupos experimentales, el porcentaje de cambio para las variables medidas durante el test incremental de press de banca fue mayor para el grupo que alcanzaba una menor pérdida de velocidad en la serie. Sin embargo, estos porcentajes de mejora mostrados por el grupo que alcanzaba una pérdida de velocidad en la serie del 25% fueron similares e incluso inferiores a los mostrados por el grupo PV15% del presente estudio y, por tanto, inferiores a los obtenidos por el grupo PV40%. Así, tomando conjuntamente los resultados de nuestro estudio y los de Pareja-Blanco (*datos sin publicar*) se puede observar cómo, comparado con el ejercicio de sentadilla completa, para las mismas intensidades relativas (70 - 85% 1RM), durante el ejercicio de press de banca es necesario alcanzar un porcentaje de pérdida de velocidad en la serie mayor (mayor grado de fatiga) para obtener las mayores ganancias de fuerza. Como indican nuestros resultados, este porcentaje de pérdida de velocidad en la serie podría estar cercano al 40%. Sin embargo, en concordancia con la sentadilla completa, parece que realizar series hasta el fallo muscular produce peores resultados (**Figura 49**). No está claro por qué es necesario alcanzar un mayor grado de fatiga en la serie en el ejercicio de press de banca comparado con el de sentadilla completa para obtener mayores ganancias de fuerza y resistencia muscular (Izquierdo, et al., 2006), pero es probable que las diferencias en biomecánica del movimiento, masa muscular implicada, tipo y proporción de fibras musculares (Mygind, 1995; Sanchis-Moysi et al., 2010), longitud de los miembros implicados en el movimiento, duración de la contracción y la velocidad de la 1RM (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2017) entre la sentadilla completa y el press de banca puedan, de alguna manera, condicionar el grado de fatiga necesario para obtener mejoras en cada ejercicio.



**Figura 49.** Relación entre la pérdida de velocidad en la serie y el porcentaje de cambio obtenido en las diferentes variables analizadas en el ejercicio de **press de banca**. Para estas relaciones se han utilizado los resultados del presente estudio y los resultados mostrados por Pareja-Blanco et al. (2016b).

Como comentamos anteriormente, además de las adaptaciones hipertróficas (Akima et al., 1999; Seynnes, de Boer, & Narici, 2007), se pueden alcanzar mejoras en la producción de fuerza después de un programa de entrenamiento de fuerza a través de la modulación en el control neural de los músculos ejercitados (Aagaard, 2003). En nuestro estudio, a diferencias de los cambios producidos durante el ejercicio de la sentadilla completa, ambos grupos de entrenamiento mostraron un ligero incremento en las variables  $RMS$ ,  $F_{\text{med}}$  y  $F_{\text{max}}$  ante cada una de las cargas analizadas en el ejercicio de press de banca. Estos cambios podrían explicar, al menos en parte, el incremento de la VMP ante las diferentes cargas absolutas (20 - 70kg) experimentado por cada grupo, ya que el incremento en estas variables ( $RMS$ ,  $F_{\text{med}}$  y  $F_{\text{max}}$ ) se ha relacionado con un mayor grado de activación como consecuencia del reclutamiento de un mayor número de unidades motoras, una mayor frecuencia de disparo de las unidades motoras activas o una mayor sincronización de dichas unidades motoras (Folland & Williams, 2007), y como consecuencia, con una mayor aplicación de fuerza (Aagaard, 2003; Aagaard, et



al., 2002; Del Balso & Cafarelli, 2007; Van Cutsem, et al., 1998). A pesar de que el grupo PV40% mostró un incremento de la VMP ante cada carga porcentualmente mayor que PV15%, los cambios en las variables de EMG fueron inferiores. Como mencionamos anteriormente en relación con el ejercicio de sentadilla completa, esto sugiere que existen otros factores, además de los cambios en la actividad eléctrica muscular, que están modulando la respuesta adaptativa en el grupo PV40%.

### ***Evolución de la 1RM<sub>est</sub> y el CMJ durante el ciclo de entrenamiento***

El control de la velocidad y el ajuste diario de la carga de entrenamiento a la velocidad objetivo permite estimar la 1RM de cada participante en cada sesión de entrenamiento y establecer la evolución de esta variable a lo largo del ciclo de entrenamiento en ambos ejercicios, sentadilla completa y press de banca (**Figuras 46 y 47**, respectivamente). En el ejercicio de sentadilla completa, el grupo PV10% mostró un incremento progresivo de la 1RM<sub>est</sub> durante todo el ciclo de entrenamiento a medida que disminuyó el *índice de esfuerzo* medio de cada semana de entrenamiento. Sin embargo, en el grupo PV30%, después de un ligero incremento del rendimiento en la primera semana de entrenamiento, se produjo un descenso en la 1RM<sub>est</sub> durante las dos semanas siguientes (S2 y S3). Esta pérdida de rendimiento coincidió con el aumento del *índice de esfuerzo* medio en estas dos semanas. Posteriormente, el *índice de esfuerzo* medio de cada semana disminuyó mientras que la 1RM<sub>est</sub> aumentó progresivamente hasta el post-test. Aunque es difícil establecer una relación causa-efecto entre el cambio en la 1RM y el *índice de esfuerzo*, la coincidencia en el tiempo de los cambios en ambas variables sugiere que el *índice de esfuerzo* puede ser un factor importante para determinar la fatiga aguda (ver **Estudio II**) y las adaptaciones que se puedan producir con el entrenamiento de fuerza.

En el ejercicio de press de banca, el grupo PV15% experimentó un aumento progresivo de la 1RM<sub>est</sub> hasta la semana 4 (S4) y a partir de este momento los valores prácticamente se mantuvieron estables hasta el post-test. Por el contrario, el grupo PV40% mostró un ligero incremento hasta la semana 5 (S5) a partir de la cual los valores de 1RM<sub>est</sub> en este grupo aumentaron considerablemente. De hecho, el grupo PV40% mostró valores de 1RM<sub>est</sub> inferiores a los del grupo PV15% hasta la semana 7 de entrenamiento, a partir de la cual el rendimiento fue ligeramente superior en términos

absolutos hasta el post-test. Por tanto, estos resultados contradicen parcialmente las conclusiones expuestas anteriormente en relación al análisis de los cambios pre-post entrenamiento, ya que en base a los resultados de la evolución de la  $1RM_{est}$  durante el ciclo de entrenamiento, es difícil afirmar que entrenar alcanzando una pérdida de velocidad del 40% es más beneficioso para la mejora de la fuerza que entrenar con una pérdida de velocidad del 15%. Esta afirmación solo es cierta si tomamos el ciclo completo de entrenamiento (8 semanas). Sin embargo, si la duración del entrenamiento hubiera sido de 6 semanas o inferior, el grupo PV15% hubiera mostrado un mayor rendimiento que PV40%. Por tanto, los resultados de la evolución de la  $1RM_{est}$  durante el ciclo parecen indicar que (1) *índices de esfuerzo* muy bajos (inferiores a 10) tienen un efecto limitado sobre la mejora de la fuerza en el ejercicio de press de banca y que, pasadas varias semanas de entrenamiento con esta *carga* de entrenamiento, probablemente sea necesario un mayor volumen de entrenamiento para generar nuevos estímulos que permitan mayores adaptaciones; (2) las mayores ganancias de fuerza obtenidas por el grupo PV40% en las 4 últimas semanas de entrenamiento en ambos ejercicios (sentadilla completa y press de banca) se pueden deber al descenso del *índice de esfuerzo* medio (menor grado de fatiga) en esas semanas, lo cual supuso para los participantes una especie de *tapering* antes del test final.

La evolución del rendimiento en la altura de salto (**Figura 46**) fue similar a la de la  $1RM_{est}$  en el ejercicio de sentadilla completa. Mientras que el grupo PV10% experimentó un aumento progresivo durante todo el ciclo de entrenamiento, los mayores aumentos del rendimiento en el CMJ para el grupo PV30% se produjeron en las 4 últimas semanas, coincidiendo con el descenso en el *índice de esfuerzo* medio de entrenamiento. Este descenso del *índice de esfuerzo* es consecuencia del propio diseño del entrenamiento, ya que, aunque se mantuvo el mismo porcentaje de pérdida de velocidad en la serie, al aumentar la intensidad relativa (o lo que es lo mismo, al disminuir la velocidad de la primera repetición de la serie), el *índice de esfuerzo* resultante fue menor y por tanto, la fatiga generada en cada sesión fue también menor (ver resultados del **Estudio II**). Como hemos comentado anteriormente, esta menor fatiga experimentada en las últimas semanas de entrenamiento en comparación con las semanas anteriores pudo suponer una especie de *tapering* para los participantes del grupo PV30% que favoreció las mejoras del rendimiento (Bosquet, Montpetit, Arvisais, & Mujika, 2007; Mujika, 1998; Mujika & Padilla, 2003)

Además de saber el efecto agudo producido por diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza, conocer la evolución de distintas variables de rendimiento durante el ciclo de entrenamiento constituye un *feedback* de gran importancia que puede ser utilizado para modificar y ajustar las cargas (volumen e intensidad relativa) de entrenamiento durante el propio ciclo de entrenamiento con el fin de modificar el estímulo proporcionado durante cada sesión. Este hecho tendría una gran aplicación práctica en deportes en los cuales se necesita alcanzar y mantener altos niveles de rendimiento durante largos periodos de tiempo debido a que compiten de manera semanal o cada pocos días. Así, en ese tipo de deportes habría que utilizar entrenamientos que produzcan el menor grado de fatiga necesario pero que no interfiera con el desarrollo de otros componentes del entrenamiento y que, además, permita la evolución de algunas variables determinantes del rendimiento.

### **Cambios bioquímicos**

Después del periodo de entrenamiento, ambos grupos experimentales solo obtuvieron incrementos significativos en la proteína TnT (**Tabla 41**). Este aumento fue significativamente superior en el grupo PV<sub>mayor</sub> comparado con PV<sub>menor</sub>. Esta proteína está relacionada, entre otros factores, con el daño muscular producido durante el ejercicio físico (Carranza-Garcia et al., 2011; Legaz-Arrese et al., 2015; Serrano-Ostariz et al., 2011). Así, dado que una mayor pérdida de velocidad en la serie ante la misma intensidad relativa está asociada con la realización de un mayor número de repeticiones, y que esto genera un mayor estrés mecánico, metabólico, hormonal y cardiovascular (Buitrago, Wirtz, Flenker, & Kleinoder, 2014; Buitrago, Wirtz, Yue, Kleinoder, & Mester, 2012), era de esperar la concentración de TnT después del entrenamiento fuera más elevada en el grupo PV<sub>mayor</sub>. Sin embargo, en los estudios antes mencionados (Carranza-Garcia, et al., 2011; Legaz-Arrese, et al., 2015; Serrano-Ostariz, et al., 2011) se analizaron los cambios en la TnT después de programas de entrenamiento de resistencia. Por tanto, para nuestro conocimiento, este es el primer estudio en el que se examina la respuesta crónica de la proteína TnT ante diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza. Nuestros resultados sugieren que los cambios en la TnT podrían reflejar las diferencias en el grado de fatiga experimentado por cada grupo experimental durante las sesiones de entrenamiento.

En cuanto a las concentraciones hormonales, aunque no se encontraron cambios significativos para ninguno de los dos grupos experimentales, PV<sub>menor</sub> mostró un aumento en la concentración basal de prolactina (18.8%), testosterona (11.9%) y el cociente testosterona-cortisol (8.8%), un descenso en la concentración basal de GH (-23.7%), mientras que la IGF-1 (1.5%) y el cortisol (1.5%) se mantuvieron prácticamente sin cambios. El grupo PV<sub>mayor</sub> reveló un aumento en las concentraciones de prolactina (11.5%), GH (31.0%), IGF-1 (3.8%) y cortisol (8.2%), mientras que la concentración basal de testosterona (-4.3%) y el cociente testosterona-cortisol (-5.3%) descendieron ligeramente.

Analizar los cambios en las concentraciones sanguíneas basales de diferentes hormonas anabólicas y catabólicas puede proporcionar una visión más precisa de los mecanismos fisiológicos involucrados en los cambios del rendimiento muscular (Izquierdo, et al., 2006; Kraemer & Ratamess, 2005). Entrenamientos de fuerza con altos volúmenes e intensidades pueden sobreestresar el sistema neuroendocrino, produciendo alteraciones en las concentraciones hormonales circulantes (Fry & Kraemer, 1997; Izquierdo, et al., 2006; Kraemer & Ratamess, 2005). Aunque el cambio crónico en las concentraciones sanguíneas hormonales ha sido menos estudiado, parece que un entrenamiento de fuerza mantenido durante largos periodos puede producir alteraciones en las concentraciones hormonales basales, indicando que esas hormonas se pueden usar también como marcadores crónicos del estrés producido por el entrenamiento de fuerza (Fry & Kraemer, 1997; Kraemer & Ratamess, 2005). Sin embargo, los resultados de los estudios publicados hasta la fecha son confusos y a veces contradictorios, pudiéndose encontrar aumentos (Marx et al., 2001), descensos (Ahtiainen, et al., 2003) o ausencia de cambios (Hakkinen, Pakarinen, Alen, & Komi, 1985; Hickson, Hidaka, Foster, Falduto, & Chatterton, 1994) en las concentraciones basales de diferentes hormonas después de un periodo de entrenamiento de fuerza. Es probable que las diferencias en los protocolos de entrenamiento utilizados en cada estudio en cuanto a intensidad relativa, volumen, tipo de ejercicio y número de ejercicios realizados haya influido en los resultados reportados (Kraemer & Ratamess, 2005).

En relación con el presente trabajo, solo conocemos un estudio (Izquierdo, et al., 2006) en la que se hayan analizado los cambios en las concentraciones basales de diferentes hormonas después de entrenamientos con distinto grado de esfuerzo. En este estudio (Izquierdo, et al., 2006) se comparó el efecto de realizar el máximo número de

repeticiones posibles en cada serie de entrenamiento con realizar la mitad de las repeticiones posibles. De acuerdo con nuestros resultados, Izquierdo et al. (2006) observaron que el grupo que entrenó con un menor número de repeticiones en cada serie de entrenamiento mostró un mayor aumento en la concentración basal de testosterona y un menor incremento en la concentración de cortisol que el grupo que realizó el máximo número de repeticiones por serie. Las concentraciones de testosterona y cortisol circulantes en sangre se han considerado como marcadores fisiológicos para evaluar los procesos de remodelación tisular durante un periodo de entrenamiento de fuerza (Hakkinen, Pakarinen, Alen, Kauhanen, & Komi, 1988; Kraemer & Ratamess, 2005). Concretamente, la testosterona se ha asociado con el crecimiento muscular al incrementar la síntesis de proteínas y reducir la degradación de las mismas, mientras que el cortisol se considera como la principal hormona de estrés (Kraemer & Ratamess, 2005). De hecho, un aumento crónico de cortisol podría tener efectos negativos para el rendimiento (Kraemer & Ratamess, 2005). Por tanto, nuestros resultados sugieren que realizar un entrenamiento alcanzando una pérdida de velocidad del 10% y 15% en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente, produce un menor estrés, como se deduce de la menor concentración de cortisol, lo cual hace que mejore el estado anabólico del músculo en comparación con alcanzar una pérdida de velocidad del 30% y 40% en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente. Esto se ve reflejado también en el cociente testosterona-cortisol (8.8% vs. -5.3% para  $PV_{\text{menor}}$  y  $PV_{\text{mayor}}$ , respectivamente), el cual se ha utilizado habitualmente para analizar el estado anabólico-catabólico y se ha vinculado con la mejora del rendimiento (Ahtiainen, Pakarinen, Alen, Kraemer, & Hakkinen, 2003; Ali Hammami et al., 2016; Fry & Kraemer, 1997; Kraemer & Ratamess, 2005).

La GH y la IGF-1 son las principales hormonas relacionadas con el crecimiento muscular (Crewther, Keogh, Cronin, & Cook, 2006; Kraemer & Ratamess, 2005). Sin embargo, en contra de los resultados encontrados por nosotros, la mayoría de los estudios indican que el entrenamiento de fuerza no parece influir en las concentraciones basales de estas hormonas (Izquierdo, et al., 2006; Kraemer et al., 1999; Kraemer, Volek, Bush, Putukian, & Sebastianelli, 1998; Marx, et al., 2001; McCall, Byrnes, Fleck, Dickinson, & Kraemer, 1999), y sugieren que el efecto de la GH y la IGF-1 sobre la remodelación tisular está mediado por el efecto agudo más que por el efecto crónico. A pesar de ello, de acuerdo con nuestros resultados, también existen algunos trabajos en

los que se ha mostrado elevaciones en las concentraciones basales de IGF-1 después de programas de entrenamiento de alto volumen (Koziris et al., 1999; Marx, et al., 2001), lo cual indica que este factor es importante para las adaptaciones crónicas de esta hormona (Kraemer & Ratamess, 2005). Además, en otros estudios se ha encontrado que el incremento repetido de GH durante el entrenamiento de fuerza tiene relación con el incremento de la hipertrofia muscular en las fibras tipo I y tipo II (McCall, et al., 1999). En relación con nuestro estudio, es probable que las mayores concentraciones basales de GH mostradas por el grupo PV<sub>mayor</sub> estén relacionadas con el mayor grado de estrés producido durante cada sesión de entrenamiento, y que éste haya inducido un mayor grado de hipertrofia muscular comparado con el grupo PV<sub>menor</sub>, el cual mostró una reducción en las concentraciones basales de GH. El estudio de Pareja-Blanco et al. (2016b), en el que se muestra cómo el grupo que entrenó con una mayor pérdida de velocidad en la serie (~40-45%) alcanzó un mayor grado de hipertrofia en comparación con otro grupo que realizó cada serie hasta alcanzar un menor porcentaje de pérdida de velocidad (~20%) podría contribuir a soportar esta hipótesis.

### **Eficiencia**

Uno de los aspectos más importante cuando se diseña un programa de entrenamiento de fuerza es intentar aplicar el mínimo estímulo que produzca una mejora en el rendimiento neuromuscular. Esto es, intentar alcanzar el mayor incremento de la fuerza, la velocidad y la capacidad de salto con el menor grado de esfuerzo eficaz en cada sesión de entrenamiento. Para ello sería necesario conocer la relación entre el porcentaje de mejora en esas variables y el grado de fatiga inducido en cada programa de entrenamiento. Por tanto, dado que la intensidad relativa es la misma para todos los grupos, conocer la eficiencia de cada programa de entrenamiento, expresada como el número de repeticiones que ha sido necesario realizar para obtener una unidad de ganancias en las variables analizadas, podría ser una aproximación adecuada para el conocimiento de la relación *fatiga-mejora del rendimiento*, y poder tomar decisiones sobre la programación del entrenamiento de fuerza.

Como se puede observar en la **Tabla 42**, para el ejercicio de sentadilla completa, el grupo PV30% necesitó aproximadamente entre 2 y 8 veces más repeticiones que PV10% para obtener el mismo porcentaje de mejora. Además, un aspecto importante a

destacar fue que, el número de repeticiones necesarias para obtener una unidad de mejora en el grupo PV30% comparado con PV10% fue mayor en aquellas acciones de mayor velocidad como el T20, T10, CMJ y VMP<sub>CB</sub>. Para el ejercicio de press de banca, a pesar de alcanzar un menor porcentaje de mejora en todas las variables analizadas, el grupo PV15% también mostró una mayor eficiencia de entrenamiento, puesto que el número de repeticiones realizado para alcanzar esas mejoras fue proporcionalmente menor a las diferencias en el porcentaje de mejora comparado con el grupo PV40%. A pesar de ello, las diferencias fueron menores (1.2 - 1.5 veces más repeticiones), e incluso, para la mejora de la resistencia muscular, el grupo PV40% mostró una mayor eficiencia (**Tabla 42**). Estas diferencias reflejan, de alguna manera, que las respuestas adaptativas difieren dependiendo del ejercicio entrenado.

A pesar de la importancia de este parámetro para el diseño y programación del entrenamiento de fuerza, solo conocemos un estudio (González-Badillo, et al., 2005) en el que se comparó la eficiencia de diferentes protocolos de entrenamiento. En este trabajo se observó que entrenar con un volumen moderado fue más eficaz y más eficiente que entrenar con las mismas intensidades relativas pero con un alto o bajo volumen de entrenamiento. Las diferencias con nuestros resultados pueden venir explicadas porque en el estudio de González-Badillo et al. (2005) los participantes fueron levantadores (halterófilos) de élite con una alta experiencia en el entrenamiento de fuerza. Por tanto, es posible que el *volumen óptimo* de entrenamiento varíe dependiendo de la población estudiada (Edad, experiencia, necesidades de fuerza del deporte, etc.).

En resumen, los resultados del presente estudio muestran que la magnitud de pérdida de velocidad alcanzada durante cada serie durante el entrenamiento de fuerza es una variable importante a considerar a la hora de configurar el estímulo de entrenamiento, puesto que influye directamente sobre las adaptaciones neuromusculares. Nuestros hallazgos sugieren que alcanzar solo una pérdida de velocidad en la serie del 10% en el ejercicio de sentadilla completa (lo que supone realizar aproximadamente el 30 - 35% de las repeticiones posibles en la serie) es un estímulo adecuado para inducir importantes mejoras en la fuerza, el salto vertical y la capacidad de aceleración. Estos cambios en el rendimiento estuvieron acompañados por un aumento de la actividad neural y un mejor balance anabólico-catabólico. Por el contrario, para el ejercicio de press de banca, parece que alcanzar un mayor grado de fatiga durante cada serie de

entrenamiento es más favorable para la mejorar la fuerza y la resistencia muscular. Por tanto, nuestros resultados sugieren que se debería de ajustar la pérdida de velocidad permitida en la serie dependiendo del ejercicio entrenado.



#### 6.4.4. Conclusiones

Las principales conclusiones del **Estudio III.1** fueron las siguientes:

- Para el ejercicio de sentadilla completa, el grupo PV10% mostró similares o mayores ganancias, según la variable analizada, de fuerza y resistencia muscular que el grupo PV30%.
- Entrenar alcanzando un 10% de pérdida de velocidad en la serie en el ejercicio de sentadilla completa produjo un mayor incremento del rendimiento en acciones de alta velocidad como el salto vertical y el sprint que entrenar con una pérdida de velocidad en la serie del 30%.
- Para el ejercicio de press de banca, el grupo PV40% mostró mayores ganancias de fuerza y resistencia muscular que el grupo PV15%.
- Entrenar con un menor grado de fatiga durante cada serie (10% en sentadilla completa y 15% en press de banca) resultó en una mayor activación neural de la musculatura agonista implicada en la sentadilla completa (RF y VL) y en el press de banca (PEC y TRI), como se deduce del aumento de las variables de EMG analizadas. Sin embargo, entrenar alcanzando un mayor grado de pérdida de velocidad en la serie (30% en sentadilla completa y 40% en press de banca) solo produjo ligeros cambios en la  $F_{med}$  y la  $F_{max}$  de la musculatura implicada en el press de banca, mientras que la EMG del cuádriceps se mantuvo sin cambios después de las 8 semanas de entrenamiento.
- Por último, el grupo que realizó un mayor volumen de entrenamiento mostró un mayor daño muscular y estrés hormonal, y un peor balance anabólico-catabólico. Sin embargo, entrenar con un mayor volumen de entrenamiento también produjo un mayor aumento de diferentes hormonas anabólicas (GH y IGF-1) lo cual pudo estar asociado con un mayor grado de hipertrofia muscular.



### 6.4.5. Aplicaciones Prácticas

Los resultados del presente estudio contribuyen de manera importante a la mejora del conocimiento sobre el diseño, la dosificación, la cuantificación y el control del entrenamiento de fuerza, así como a la comprensión del efecto de la *carga* de entrenamiento, entendida ésta como la síntesis global de la *intensidad* y el *volumen*. La pérdida de velocidad durante la serie como forma de cuantificar el grado de esfuerzo ante el mismo rango de intensidades relativas nos proporciona información válida para tratar de encontrar el grado más adecuado de fatiga individual o grupal para maximizar las ganancias en el rendimiento. Como se ha podido deducir del presente estudio, la pérdida de velocidad experimentada durante la serie influye directamente sobre las adaptaciones funcionales, neurales y probablemente estructurales, así como sobre el daño muscular y el estrés hormonal crónico. En relación con esto, anteriormente se había sugerido que una vez alcanzada una pérdida de velocidad en la serie moderada (~20%) en el ejercicio de sentadilla completa, no sería adecuado completar un mayor número de repeticiones, ya que es probable que no se produjeran mayores ganancias de fuerza e incluso realizar un mayor volumen de entrenamiento podría ser perjudicial para las adaptaciones relacionadas con la producción de fuerza por unidad de tiempo (Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco et al., 2016). Nuestros resultados parecen confirmar que alcanzar pérdidas de velocidad en la serie superiores al 20% en el ejercicio de sentadilla completa produce menores ganancias sobre el rendimiento neuromuscular, principalmente en acciones de alta velocidad como el salto y el sprint. Sin embargo, los datos del presente estudio también sugieren que alcanzar pérdidas de velocidad en la serie inferiores al 20% en el ejercicio de sentadilla completa puede ser igual o incluso más beneficioso para obtener ganancias de fuerza, salto y velocidad en carrera. Estos hallazgos tienen una gran importancia práctica para aquellos deportistas cuyo objetivo es desarrollar adaptaciones neuromusculares específicas que permitan mejorar su capacidad de aplicar fuerza en cortos periodos de tiempo de una manera altamente eficiente, sin un grado de fatiga excesivo que pueda interferir con el entrenamiento de otras habilidades técnico-tácticas específicas y sin un excesivo grado de hipertrofia que pueda producir un aumento del peso corporal que repercuta negativamente en su rendimiento.

Otra importante aplicación práctica derivada de nuestro estudio es que la programación de la pérdida de velocidad permitida en cada serie de entrenamiento con el objetivo de

mejorar el rendimiento neuromuscular es específica de cada ejercicio. Mientras que para obtener una mayor magnitud de mejora en el ejercicio de sentadilla completa es suficiente con alcanzar pérdidas de velocidad en la serie que oscilen entre el 10 - 20% (según nuestros datos y el estudio citado de Pareja-Blanco et al., 2016b), para lograr mayores ganancias de fuerza y resistencia muscular en el ejercicio de press de banca es necesario alcanzar un porcentaje de pérdida de velocidad en la serie próximo al 40%. Por tanto, no sería adecuado tomar una determinada pérdida de velocidad en la serie y aplicarla a todos los ejercicio, sino que ésta debería ser adaptada a cada uno de ellos, para lo cual se necesita realizar más estudios que nos permitan aproximarnos al grado de pérdida de velocidad *óptimo* para cada ejercicio y cada rango de intensidades relativas.

## **6.5. Estudio III.2:**

***Comparación de tres magnitudes de pérdida de velocidad en la serie (10%, 30% y 45% en sentadilla completa, y 15%, 40% y 55% en press de banca) ante las mismas intensidades relativas (55 - 70% 1RM) sobre la fuerza, el rendimiento físico y los cambios neurales y hormonales***





**6.5. Estudio III.2: Comparación de tres magnitudes de pérdida de velocidad en la serie (10%, 30% y 45% en sentadilla completa, y 15%, 40% y 55% en press de banca) ante las mismas intensidades relativas (55 - 70% 1RM) sobre el rendimiento neuromuscular y los cambios hormonales.**

### 6.5.1. Metodología

#### A. Tipo de Investigación

Dadas las características de los datos, el **Estudio III.2** es una investigación *cuantitativa*. Por el grado de manipulación de las variables y los objetivos del estudio, nuestra investigación es fundamentalmente *experimental*, con la variable *pérdida de velocidad en la serie* como variable independiente. Por el enfoque del análisis de los datos, la investigación es en parte *inferencial* con las variables independientes indicadas. Por último, la investigación es de carácter fundamentalmente *longitudinal*, ya que analizamos los cambios en la respuesta mecánica y fisiológica durante un periodo aproximado de dos meses y medio.

#### B. Muestra

En este estudio participaron un total de 36 hombres sanos y físicamente activos. Todos eran estudiantes del Grado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte con al menos 6 meses de experiencia previa en el entrenamiento de fuerza. Además, estaban familiarizados con los ejercicios de press de banca y sentadilla completa porque habían participado previamente en algunas evaluaciones y tests con nuestro grupo de trabajo. Después de la evaluación inicial, los sujetos fueron ordenados según su  $1RM_{est}$  y se distribuyeron aleatoriamente mediante el procedimiento ABCCBA en 3 grupos que diferían únicamente en la magnitud de pérdida de velocidad (PV) permitida en cada serie de entrenamiento: (1) Un grupo que alcanzó una pérdida de velocidad en la serie del 10% y el 15% para los ejercicios de sentadilla completa y press de banca,

respectivamente ( $PV_{\text{menor}}$ ;  $n = 12$ ); (2) otro grupo que alcanzó una pérdida de velocidad en la serie del 30% y el 40% para los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente ( $PV_{\text{media}}$ ;  $n = 12$ ); y otro que alcanzó una pérdida de velocidad en la serie del 45% y el 55% para los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente ( $PV_{\text{mayor}}$ ;  $n = 12$ ). Durante el transcurso del estudio, dos participantes (1 del grupo  $PV_{\text{menor}}$  y otro del grupo  $PV_{\text{media}}$ ) sufrieron lesiones por causas ajenas a la realización del estudio y no pudieron completar todas las sesiones programadas. Por tanto, no se consideraron para el análisis estadístico posterior. Las características de los participantes aparecen en la **Tabla 43**. Tras ser informados del propósito de la investigación y los procedimientos experimentales, todos los participantes dieron su consentimiento por escrito, firmando el documento de Consentimiento Informado (**ANEXO I**) antes de tomar parte en el estudio.

Los requisitos necesarios para participar en este estudio han sido descritos previamente en la metodología del **Estudio I.1**. (Apartado 4.4.1.B).

**Tabla 43.** Características físicas descriptivas de los participantes en el **Estudio III.2**.

Variable	$PV_{\text{menor}}$ (n = 11)	$PV_{\text{media}}$ (n = 11)	$PV_{\text{mayor}}$ (n = 11)
Edad (años)	$23.8 \pm 3.9$	$21.0 \pm 2.3$	$21.6 \pm 2.8$
Masa corporal (kg)	$70.7 \pm 5.1$	$73.7 \pm 9.4$	$72.1 \pm 9.6$
Talla (m)	$1.76 \pm 0.04$	$1.76 \pm 0.07$	$1.74 \pm 0.08$

$PV_{\text{menor}}$ : Grupo que entrenó con una menor pérdida de velocidad en la serie

$PV_{\text{media}}$ : Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie media

$PV_{\text{mayor}}$ : Grupo que entrenó con una mayor pérdida de velocidad en la serie

### C. Diseño del Estudio

El objetivo del presente estudio fue analizar el efecto del grado de pérdida de velocidad permitida dentro de la serie (grado de fatiga) sobre los cambios en la fuerza, el salto vertical, la capacidad de aceleración, la actividad eléctrica muscular y la concentración hormonal. En las dos semanas previas a la realización de los tests, se llevaron a cabo 4 sesiones de familiarización (2 sesiones por semana) que consistieron en la realización de varias series de entrenamiento (en el ejercicio de press de banca y sentadilla completa) ejecutando cada repetición a la máxima velocidad posible y 3 series de 4 CMJ para



adquirir una correcta ejecución técnica de los ejercicios. Durante estas sesiones de familiarización, los participantes eran informados en tiempo real de la velocidad a la que estaban realizando cada repetición. El periodo de entrenamiento tuvo una duración de 8 semanas en las cuales se llevaron a cabo 16 sesiones (2 sesiones por semana) de entrenamiento en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca. Solo aquellos participantes que asistieron al 100% de las sesiones de entrenamiento fueron considerados para el análisis (**Tabla 43**). Los tres grupos experimentales entrenaron con la misma intensidad relativa en cada sesión (55 - 70% 1RM), el mismo número de series (3 series) y el mismo tiempo de recuperación entre series (4 min). La única diferencia entre los tres grupos fue el porcentaje de pérdida de velocidad permitido en cada serie de entrenamiento: 10% (PV10%) vs. 30% (PV30%) vs. 45% (PV45%) para el ejercicio de sentadilla completa y 15% (PV15%) vs. 40% (PV40%) vs. 55% (PV55%) para el ejercicio de press de banca. Todas las sesiones de entrenamiento se realizaron en un laboratorio bajo la supervisión directa de los investigadores, a la misma hora del día ( $\pm 1$  h) para cada participante y bajo condiciones ambientales controladas y estables ( $\sim 20^{\circ}\text{C}$  y  $\sim 60\%$  humedad). Se pidió a los participantes que no tomaran parte en ningún otro tipo de actividad física extenuante, entrenamientos o competiciones deportivas que pudieran influir en los resultados de la investigación durante el transcurso del presente estudio. Antes (Pre) y después (Post) de las 8 semanas de entrenamiento, los participantes fueron evaluados utilizando los siguientes test: (1) test de carrera en 20 m; (2) test de salto vertical CMJ; (3) test isoinercial con cargas progresivas en el ejercicio de sentadilla completa; (4) test de fatiga muscular en el ejercicio de sentadilla completa; (5) test isoinercial con cargas progresivas en el ejercicio de press de banca; y (6) test de fatiga muscular en el ejercicio de press de banca.

#### D. Variables Objeto de Estudio

##### *Variables independientes*

- ***Pérdida de velocidad en la serie, en porcentaje:*** Máxima porcentaje de pérdida de velocidad permitida en cada serie de entrenamiento con respecto a la mayor velocidad conseguida en la serie. Las magnitudes de pérdida de velocidad utilizadas en el presente estudio fueron 10%, 30% y 45% para el ejercicio de sentadilla completa y 15%, 40% y 55% para el ejercicio de press de banca.

### **Variables dependientes**

Las variables dependientes analizadas en el **Estudio III.2** fueron:

#### **Mecánicas:**

- ***IRM estimada ( $IRM_{est}$ ), en kg:*** Estimación de la fuerza dinámica máxima en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.
- ***VMP con las cargas comunes ( $VMP_{CC}$ ), en  $m \cdot s^{-1}$ :*** Calculada como el promedio de la VMP obtenidas con aquellas cargas absolutas del test isoinercial de cargas progresivas que fueron comunes en el test inicial y el test final para los ejercicios de sentadilla y press de banca.
- ***VMP ante cargas iguales o inferiores al ~60% IRM ( $VMP_{CB}$ ), en  $m \cdot s^{-1}$ :*** Calculada como el promedio de la VMP obtenidas con aquellas cargas absolutas que se podían desplazar a una VMP igual o superior a  $1.00 m \cdot s^{-1}$  y  $0.80 m \cdot s^{-1}$  en el test inicial de cargas progresivas en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente.
- ***VMP ante cargas superiores al ~60% IRM ( $VMP_{CA}$ ), en  $m \cdot s^{-1}$ :*** Calculada como el promedio de la VMP obtenidas con aquellas cargas absolutas que se podían desplazar a una VMP inferior a  $1.00 m \cdot s^{-1}$  y  $0.80 m \cdot s^{-1}$  en el test inicial de cargas progresivas en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente.
- ***VMP ante distintas cargas absolutas, en  $m \cdot s^{-1}$ :*** Cambios en la VMP obtenida con las cargas de 30, 40, 50, 60, 70 y 80 kg ( $VSQ_{30,40,50,60,70,80}$ ) en el ejercicio de sentadilla completa, y 20, 30, 40, 50, 60 kg ( $VPB_{20,30,40,50,60}$ ) en el ejercicio de press de banca.
- ***Altura en el salto vertical (CMJ), en cm:*** Promedio de los 3 saltos considerados para el análisis antes y después del programa de entrenamiento.
- ***Tiempo en 10 m ( $T10$ ), en segundos:*** Tiempo en recorrer una distancia de 10 m en el test de carrera en 20 m.

- **Tiempo en 20 m (T20), en segundos:** Tiempo en recorrer una distancia de 20 m en el test de carrera en 20 m.
- **Número de repeticiones:** Número de repeticiones completado en los test de fatiga muscular realizados en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca.
- **Índice de esfuerzo (IE):** Promedio del producto de la mejor velocidad (normalmente la primera o la segunda repetición) de la primera serie de la sesión de entrenamiento con la carga máxima del día por el promedio de pérdida de velocidad de las 3 series de entrenamiento (i.e.,  $VMP_{\text{mejor}} \times \text{promedio de PV}$ ) de las 16 sesiones de entrenamiento.

El cálculo de las variables  $VMP_{CC}$ ,  $VMP_{CB}$  y  $VMP_{CA}$  ya ha sido mostrado previamente en la metodología del **Estudio III.1** (Apartado 6.4.1.D, **Tabla 34**).

#### **Hormonales:**

- **Concentración de testosterona total, en  $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$**
- **Concentración de cortisol, en  $\text{nmol}\cdot\text{L}^{-1}$**
- **Concentración de hormona del crecimiento (GH), en  $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$**
- **Concentración de somatomedinas (insulin-like growth factor-I: IGF-1), en  $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$**
- **Concentración de prolactina, en  $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$**

#### **Biomarcadores:**

- **Concentración de troponina T cardiaca (TnT), en  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$**

#### **EMG:**

- **Root mean square (RMS), en mV:** La media cuadrática o RMS (Root Mean Square) se define como la raíz cuadrada de la media aritmética de los elementos al cuadrado. Es decir, consiste en elevar al cuadrado todas las puntuaciones, obtener después su media aritmética y extraer, finalmente, la raíz cuadrada de dicha media para volver a la unidad de medida original:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad mV$$

- **Frecuencia Mediana ( $F_{med}$ ), en Hz:** Se calcula a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT) y se define como la frecuencia que divide el espectro en dos partes equivalentes respecto a la potencia:

$$\int_0^{f_{med}} S(f) df = \int_{f_{med}}^{\infty} S(f) df \quad Hz$$

- **Frecuencia máxima ( $F_{max}$ ), en Hz:** Se calcula a partir de la transformada rápida de Fourier (FFT) y se define como el valor máximo de potencia alcanzado en el espectro de la señal.

## E. Control de Variables Extrañas

Este apartado ya ha sido descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.E).

## F. Evaluaciones y Pruebas Físicas

### *Análisis antropométrico*

- **Masa corporal** (kg): descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F).
- **Talla** (m): descrito previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F).

### *Análisis sanguíneo*

El procedimiento de extracción y análisis de sangre ya ha sido explicado previamente en la metodología del **Estudio III.1** (Apartado 6.4.1.F).

### *Pruebas físicas*

- **Test de velocidad en 20 m:** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 5.4.F). El CCI para T10 y T20 fueron 0.922 (0.844 - 0.961) y 0.964 (0.929 - 0.982), respectivamente, mientras que el CV fue de 1.8% y 1.1%, respectivamente.
- **Test de salto con contramovimiento (CMJ):** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 5.4.F). El test de CMJ mostró un bajo CV (1.44%) y un alto CCI [0.996 (0.994 - 0.998)].
- **Test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de sentadilla completa:** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 5.4.F). Antes de la realización del test se procedió a la colocación de los electrodos para el registro y adquisición de la actividad eléctrica muscular en los músculos RF y VL. El procedimiento de colocación y adquisición de los datos también ha sido descrito previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 5.4.F).

- **Test de fatiga muscular en el ejercicio de sentadilla completa:** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 6.4.1.F). A continuación se muestra una tabla en la que aparece un resumen de las principales variables mecánicas del test (**Tabla 44**).

**Tabla 44.** Resumen de las principales variables que definen el test de fatiga muscular en el ejercicio de sentadilla completa.

Grupo	Pre			Post		
	Carga (kg)	VMP <sub>mejor</sub>	VMP <sub>última</sub>	Carga (kg)	VMP <sub>mejor</sub>	VMP <sub>última</sub>
VL10%	66.6 ± 10.6	0.85 ± 0.05	0.45 ± 0.05	66.6 ± 10.6	1.00 ± 0.07	0.44 ± 0.02
VL30%	68.2 ± 12.7	0.81 ± 0.05	0.44 ± 0.07	68.2 ± 12.7	0.99 ± 0.07	0.44 ± 0.03
VL45%	67.3 ± 11.2	0.86 ± 0.07	0.45 ± 0.05	67.3 ± 11.2	0.95 ± 0.05	0.46 ± 0.02

PV10%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 10%; PV30%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 30%; PV45%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 45%; Pre: Test inicial; Post: Test final; VMP<sub>mejor</sub>: Velocidad media propulsiva de la repetición más rápida de la serie (normalmente la primera repetición); VMP<sub>última</sub>: Velocidad media propulsiva de la última repetición de la serie.

- **Test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de press de banca:** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.F). Antes de la realización del test se procedió a la colocación de los electrodos para el registro y adquisición de la actividad eléctrica muscular en los músculos Pectoral y Tríceps. El procedimiento de colocación y adquisición de los datos también ha sido descrito previamente en la metodología del **Estudio III.1** (Apartado 6.4.1.F).
- **Test de fatiga muscular en el ejercicio de press de banca:** La realización de este test ya ha sido descrita previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 6.4.1.F). En la **Tabla 45** aparece un resumen de las principales variables mecánicas del test.

**Tabla 45.** Resumen de las principales variables que definen el test de fatiga muscular en el ejercicio de press de banca.

Grupo	Pre			Post		
	Carga (kg)	VMP <sub>mejor</sub>	VMP <sub>última</sub>	Carga (kg)	VMP <sub>mejor</sub>	VMP <sub>última</sub>
VL15%	41.4 ± 6.4	0.75 ± 0.05	0.15 ± 0.05	41.4 ± 6.4	1.00 ± 0.07	0.16 ± 0.05
VL40%	40.0 ± 7.3	0.76 ± 0.04	0.14 ± 0.05	40.0 ± 7.3	0.99 ± 0.07	0.17 ± 0.07
VL55%	40.4 ± 7.4	0.76 ± 0.04	0.14 ± 0.04	40.4 ± 7.4	0.95 ± 0.05	0.15 ± 0.03

PV15%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 15%; PV40%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 40%; PV55%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 55%; Pre: Test inicial; Post: Test final; VMP<sub>mejor</sub>: Velocidad media propulsiva de la repetición más rápida de la serie (normalmente la primera repetición); VMP<sub>última</sub>: Velocidad media propulsiva de la última repetición de la serie.

- Protocolo de entrenamiento:** Todos los participantes llevaron a cabo 16 sesiones de entrenamiento de fuerza en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca distribuidas en 8 semanas (2 sesiones por semana). Todas las variables que definen el entrenamiento tales como la intensidad relativa (55 - 70% 1RM), el número de series (tres), el tiempo de recuperación entre series (4 min) y el tiempo de recuperación entre sesiones (48 - 72 h) fueron iguales para los tres grupos experimentales, excepto el porcentaje de pérdida de velocidad permitido en cada serie de entrenamiento: 10, 30 y 45% en el ejercicio de sentadilla completa y 15, 40 y 55% en el ejercicio de press de banca. Las características del programa de entrenamiento de fuerza realizado en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca se encuentran descritas en las **Tabla 46 y 47**. La intensidad relativa para cada participante en cada sesión de entrenamiento se determinó a partir de la relación porcentaje de 1RM-velocidad en los ejercicios de press de banca y sentadilla, ya que se ha encontrado que existe una estrecha relación entre el porcentaje de 1RM y la VMP en ambos ejercicios (Gonzalez-Badillo & Sanchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2017). Así, se usó una determinada VMP objetivo en cada sesión como estimación del porcentaje de 1RM. Esta velocidad tenía que ser alcanzada durante la primera o segunda repetición de la primera serie de entrenamiento. Dichas velocidades objetivo fueron las siguientes: 1)  $\sim 0.86 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (55% 1RM),  $\sim 0.78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (60% 1RM),  $\sim 0.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (65% 1RM), y  $\sim 0.62 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (70% 1RM), para el ejercicio de press de banca (Gonzalez-Badillo & Sanchez-Medina, 2010); 2)  $\sim 1.06 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (55% 1RM),  $\sim 0.98 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (60% 1RM),  $\sim 0.90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (65% 1RM), y  $\sim 0.82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (70% 1RM) para el ejercicio de sentadilla completa (Pallares, Sanchez-Medina, Perez, De La Cruz-Sanchez, & Mora-Rodriguez, 2014; Sánchez-Medina, et al.,

2017). Para poder ajustar la velocidad de ejecución a la velocidad asociada ( $\pm 0.03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) con cada porcentaje de 1RM objetivo de cada sesión, la carga absoluta (kg) se ajustó individualmente para cada participante durante cada sesión. El volumen de entrenamiento se estimó objetivamente a través de la pérdida de velocidad alcanzada en cada serie de entrenamiento. Así, dependiendo del grupo en el que fueron incluidos, cada participante realizó repeticiones en la serie hasta alcanzar un 10, 30 o 45% de pérdida de velocidad con respecto a la mayor VMP alcanzada en dicha serie para el ejercicio de sentadilla completa, y 15, 40 o 55% para el ejercicio de press de banca. Tanto en el ejercicio de sentadilla completa como en el de press de banca, el grupo  $PV_{\text{menor}}$  comenzó desde la primera sesión con la pérdida de velocidad asignada (10% en sentadilla completa y 15% en press de banca). Sin embargo, los grupos  $PV_{\text{media}}$  y  $PV_{\text{mayor}}$  realizaron una progresión en la pérdida de velocidad permitida en la serie de una ( $PV_{\text{media}}$ ) o dos ( $PV_{\text{mayor}}$ ) sesiones (**Tablas 46 y 47**). Hay que tener en cuenta que, con las intensidades relativas utilizadas en el presente estudio (55 - 70% 1RM): (1) una pérdida de velocidad en la serie del 10% en sentadilla completa y 15% en press de banca supone realizar el ~25-33% y ~30% de las repeticiones realizables, respectivamente; (2) una pérdida de velocidad en la serie del 30% en sentadilla completa y 40% en press de banca supone realizar el ~58-64% y ~65% de las repeticiones realizables, respectivamente; y (3) una pérdida de velocidad en la serie del 45% en sentadilla completa y 55% en press de banca supone realizar el ~77-82% y ~80% de las repeticiones realizables, respectivamente (ver **Tabla 13, Estudio I.3**). Por tanto, realizamos una progresión en los grupos de mayor pérdida de velocidad en la serie para intentar asemejar el entrenamiento realizado a la realidad de la práctica deportiva y permitir a los participantes adaptarse progresivamente a las cargas de entrenamiento, evitando así una carga excesiva en las primeras sesiones. Como hemos comprobado en el **Estudio II** de la presente Tesis Doctoral, realizar sesiones con pérdidas de velocidad en la serie del 30% y 45% en el ejercicio de sentadilla completa y 40 y 55% en el ejercicio de press de banca producen un alto estrés mecánico, metabólico y neuromuscular. Por tanto, si no hacíamos esta progresión en la pérdida de velocidad en la serie, teníamos una alta probabilidad de que los participantes (principalmente los del grupo  $PV_{\text{mayor}}$ ) no fueran capaces de soportar las *cargas* durante todo el ciclo de entrenamiento. Todas las repeticiones de todos los participantes durante todas las sesiones fueron registradas mediante un transductor lineal de velocidad. Antes de realizar las 3



series de entrenamiento con el peso más alto programado para cada sesión, se realizó un calentamiento estandarizado con cargas inferiores, el cual fue el mismo para los 3 grupos experimentales y consistió en lo siguiente: (1) para las sesiones 1 - 5, una serie de 6 repeticiones con el 50% 1RM; (2) para las sesiones 6 - 9, dos serie de 6 y 4 repeticiones con el 50 y 55% 1RM, respectivamente; (3) para las sesiones 10 - 13, dos serie de 6 y 4 repeticiones con el 50 y 60% 1RM, respectivamente; y (4) para las sesiones 14 - 16, tres serie de 6, 4 y 2 repeticiones con el 50, 60 y 65% 1RM, respectivamente. El tiempo de recuperación entre series durante el calentamiento fue de 3 min.

**Tabla 46.** Características descriptivas de los protocolos de entrenamiento de fuerza realizados en cada sesión para el ejercicio de **sentadilla completa**.

<i>Programado</i>	<i>Sesión 1</i>	<i>Sesión 2</i>	<i>Sesión 3</i>	<i>Sesión 4</i>	<i>Sesión 5</i>	<i>Sesión 6</i>	<i>Sesión 7</i>	<i>Sesión 8</i>
<b>Series x PV (%)</b>								
PV10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%
PV30%	3 x 20%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 25%	3 x 30%	3 x 30%
PV45%	3 x 20%	3 x 35%	3 x 45%	3 x 45%	3 x 45%	3 x 35%	3 x 45%	3 x 45%
<b>VMP objetivo (m·s<sup>-1</sup>)</b>	~1.06	~1.06	~1.06	~1.06	~1.06	~0.98	~0.98	~0.98
	(55% 1RM)	(55% 1RM)	(55% 1RM)	(55% 1RM)	(55% 1RM)	(60% 1RM)	(60% 1RM)	(60% 1RM)
<b>Realizado</b>								
<b>PV (%)</b>								
PV10%	10.6 ± 0.8	9.4 ± 1.1	10.5 ± 1.0	11.1 ± 1.6	11.1 ± 1.4	11.5 ± 2.2	10.6 ± 1.6	10.9 ± 1.7
PV30%	20.4 ± 1.9	29.6 ± 2.4	29.4 ± 1.3	29.2 ± 1.1	31.2 ± 2.0	28.1 ± 3.6	30.4 ± 2.4	30.5 ± 2.3
PV45%	20.0 ± 1.9	34.3 ± 1.6	45.1 ± 2.1	43.4 ± 2.0	45.0 ± 2.5	35.5 ± 2.5	44.7 ± 2.2	44.9 ± 1.8
<b>VMP promedio (m·s<sup>-1</sup>)</b>								
PV10%	1.07 ± 0.02	1.07 ± 0.03	1.07 ± 0.03	1.08 ± 0.03	1.06 ± 0.02	0.99 ± 0.02	0.99 ± 0.02	0.99 ± 0.03
	(~54.4% 1RM)	(~53.9% 1RM)	(~54.1% 1RM)	(~53.8% 1RM)	(~54.5% 1RM)	(~59.4% 1RM)	(~59.2% 1RM)	(~59.5% 1RM)
PV30%	1.06 ± 0.02	1.08 ± 0.03	1.07 ± 0.02	1.07 ± 0.03	1.07 ± 0.03	1.00 ± 0.03	0.99 ± 0.02	1.00 ± 0.02
	(~54.6% 1RM)	(~53.7% 1RM)	(~54.3% 1RM)	(~54.1% 1RM)	(~54.1% 1RM)	(~58.9% 1RM)	(~59.4% 1RM)	(~59.0% 1RM)
PV45%	1.08 ± 0.04	1.07 ± 0.03	1.06 ± 0.03	1.07 ± 0.02	1.06 ± 0.03	1.00 ± 0.02	0.98 ± 0.02	0.99 ± 0.03
	(~53.2% 1RM)	(~54.2% 1RM)	(~54.8% 1RM)	(~54.4% 1RM)	(~54.6% 1RM)	(~59.1% 1RM)	(~60.2% 1RM)	(~59.3% 1RM)

Tabla 46. Continuación

<i>Programado</i>	<i>Sesión 9</i>	<i>Sesión 10</i>	<i>Sesión 11</i>	<i>Sesión 12</i>	<i>Sesión 13</i>	<i>Sesión 14</i>	<i>Sesión 15</i>	<i>Sesión 16</i>
<b>Series x PV (%)</b>								
PV10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%	3 x 10%
PV30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%	3 x 30%
PV45%	3 x 45%	3 x 45%	3 x 45%	3 x 45%	3 x 45%	3 x 45%	3 x 45%	3 x 45%
<b>VMP objetivo (<math>\text{m}\cdot\text{s}^{-1}</math>)</b>	-0.98	-0.90	-0.90	-0.90	-0.90	-0.82	-0.82	-0.82
	(60% 1RM)	(65% 1RM)	(65% 1RM)	(65% 1RM)	(65% 1RM)	(70% 1RM)	(70% 1RM)	(70% 1RM)
<b>Realizado</b>								
<b>Total</b>								
<b>PV (%)</b>								
PV10%	11.3 ± 2.1	10.6 ± 2.5	10.8 ± 1.5	11.7 ± 2.2	11.9 ± 2.7	11.3 ± 2.6	10.8 ± 2.3	11.1 ± 1.2
PV30%	29.7 ± 1.5	32.0 ± 3.5	31.4 ± 3.7	30.6 ± 3.3	31.4 ± 1.8	32.1 ± 2.3	31.6 ± 3.0	30.1 ± 1.8
PV45%	44.5 ± 2.2	44.7 ± 2.6	45.3 ± 4.0	45.9 ± 2.7	44.9 ± 2.6	46.4 ± 2.2	45.1 ± 2.3	44.3 ± 3.1
<b>VMP promedio (<math>\text{m}\cdot\text{s}^{-1}</math>)</b>								
PV10%	0.98 ± 0.02	0.91 ± 0.03	0.91 ± 0.02	0.91 ± 0.01	0.91 ± 0.02	0.84 ± 0.02	0.84 ± 0.02	0.81 ± 0.02
	(~59.9% 1RM)	(~65.0% 1RM)	(~64.2% 1RM)	(~64.8% 1RM)	(~64.5% 1RM)	(~69.2% 1RM)	(~69.5% 1RM)	(~70.9% 1RM)
PV30%	0.99 ± 0.02	0.90 ± 0.02	0.92 ± 0.02	0.92 ± 0.02	0.90 ± 0.01	0.83 ± 0.03	0.84 ± 0.03	0.84 ± 0.02
	(~59.4% 1RM)	(~65.3% 1RM)	(~63.9% 1RM)	(~64.1% 1RM)	(~65.1% 1RM)	(~69.8% 1RM)	(~69.4% 1RM)	(~69.0% 1RM)
PV45%	1.00 ± 0.02	0.92 ± 0.02	0.91 ± 0.03	0.90 ± 0.03	0.90 ± 0.02	0.82 ± 0.03	0.84 ± 0.03	0.83 ± 0.02
	(~58.8% 1RM)	(~63.9% 1RM)	(~64.6% 1RM)	(~65.4% 1RM)	(~65.4% 1RM)	(~70.3% 1RM)	(~69.6% 1RM)	(~70.1% 1RM)

PV: Pérdida de velocidad; VMP: Velocidad media propulsiva; 1RM: Una repetición máxima

**Tabla 47.** Características descriptivas de los protocolos de entrenamiento de fuerza realizados en cada sesión para el ejercicio de **press de banca**.

<i>Programado</i>	<i>Sesión 1</i>	<i>Sesión 2</i>	<i>Sesión 3</i>	<i>Sesión 4</i>	<i>Sesión 5</i>	<i>Sesión 6</i>	<i>Sesión 7</i>	<i>Sesión 8</i>
<b>Series x PV (%)</b>								
PV15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%
PV40%	3 x 25%	3 x 40%	3 x 40%	3 x 40%	3 x 40%	3 x 30%	3 x 40%	3 x 40%
PV55%	3 x 25%	3 x 45%	3 x 55%	3 x 55%	3 x 55%	3 x 45%	3 x 55%	3 x 55%
<b>VMP objetivo (m·s<sup>-1</sup>)</b>	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.78	0.78	0.78
	(~55% 1RM)	(~55% 1RM)	(~55% 1RM)	(~55% 1RM)	(~55% 1RM)	(~60% 1RM)	(~60% 1RM)	(~60% 1RM)
<b>Realizado</b>								
<b>PV (%)</b>								
PV15%	16.0 ± 1.9	16.1 ± 2.1	15.5 ± 1.7	15.8 ± 3.2	14.8 ± 2.4	16.6 ± 2.9	15.4 ± 2.2	16.1 ± 2.8
PV40%	27.1 ± 1.9	38.3 ± 1.4	39.8 ± 2.3	40.5 ± 2.5	40.4 ± 2.8	30.1 ± 2.0	39.3 ± 3.1	39.4 ± 2.2
PV55%	27.9 ± 4.9	44.1 ± 2.1	54.7 ± 2.7	55.5 ± 2.2	54.3 ± 2.4	44.0 ± 2.9	55.6 ± 2.6	54.7 ± 1.8
<b>VMP promedio (m·s<sup>-1</sup>)</b>								
PV15%	0.87 ± 0.03	0.88 ± 0.01	0.85 ± 0.02	0.87 ± 0.02	0.86 ± 0.01	0.78 ± 0.02	0.77 ± 0.02	0.78 ± 0.04
	(~55.1% 1RM)	(~54.5% 1RM)	(~55.8% 1RM)	(~55.1% 1RM)	(~55.3% 1RM)	(~60.1% 1RM)	(~60.6% 1RM)	(~60% 1RM)
PV40%	0.86 ± 0.02	0.87 ± 0.03	0.86 ± 0.02	0.86 ± 0.02	0.86 ± 0.03	0.80 ± 0.02	0.78 ± 0.03	0.78 ± 0.03
	(~55.4% 1RM)	(~54.5% 1RM)	(~55.2% 1RM)	(~55.6% 1RM)	(~55.6% 1RM)	(~59.2% 1RM)	(~60.0% 1RM)	(~59.9% 1RM)
PV55%	0.86 ± 0.04	0.87 ± 0.03	0.86 ± 0.03	0.84 ± 0.02	0.86 ± 0.02	0.78 ± 0.02	0.78 ± 0.03	0.79 ± 0.04
	(~55.5% 1RM)	(~54.8% 1RM)	(~55.3% 1RM)	(~56.4% 1RM)	(~55.4% 1RM)	(~60.0% 1RM)	(~60.1% 1RM)	(~59.3% 1RM)

Tabla 47. Continuación.

<i>Programado</i>	<i>Sesión 9</i>	<i>Sesión 10</i>	<i>Sesión 11</i>	<i>Sesión 12</i>	<i>Sesión 13</i>	<i>Sesión 14</i>	<i>Sesión 15</i>	<i>Sesión 16</i>
<b>Series x PV (%)</b>								
PV15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%	3 x 15%
PV40%	3 x 40%	3 x 40%	3 x 40%	3 x 40%	3 x 40%	3 x 40%	3 x 40%	3 x 40%
PV55%	3 x 55%	3 x 55%	3 x 55%	3 x 55%	3 x 55%	3 x 55%	3 x 55%	3 x 55%
<b>VMP objetivo (m·s<sup>-1</sup>)</b>	0.78	0.70	0.70	0.70	0.70	0.62	0.62	0.62
	(~60% 1RM)	(~65% 1RM)	(~65% 1RM)	(~65% 1RM)	(~65% 1RM)	(~70% 1RM)	(~70% 1RM)	(~70% 1RM)
<b>Realizado</b>								
<b>PV (%)</b>								
PV15%	14.4 ± 1.8	15.3 ± 2.0	15.4 ± 1.8	15.3 ± 3.0	14.4 ± 2.7	16.3 ± 2.7	16.5 ± 3.1	16.4 ± 1.9
PV40%	41.4 ± 3.9	39.8 ± 2.1	40.4 ± 2.7	40.7 ± 2.5	40.5 ± 2.4	39.8 ± 3.2	38.8 ± 3.1	41.6 ± 4.4
PV55%	56.0 ± 2.2	54.2 ± 3.4	55.3 ± 3.1	54.5 ± 2.2	55.4 ± 2.3	56.2 ± 3.6	57.1 ± 3.5	57.5 ± 4.1
<b>VMP promedio (m·s<sup>-1</sup>)</b>								
PV15%	0.79 ± 0.02	0.70 ± 0.03	0.68 ± 0.02	0.70 ± 0.02	0.69 ± 0.03	0.63 ± 0.03	0.61 ± 0.02	0.61 ± 0.03
	(~59.5% 1RM)	(~65.1% 1RM)	(~66.4% 1RM)	(~65.0% 1RM)	(~65.4% 1RM)	(~69.6% 1RM)	(~70.4% 1RM)	(~70.8% 1RM)
PV40%	0.76 ± 0.03	0.70 ± 0.03	0.69 ± 0.02	0.70 ± 0.02	0.71 ± 0.01	0.62 ± 0.04	0.61 ± 0.04	0.61 ± 0.03
	(~61.2% 1RM)	(~65.0% 1RM)	(~65.4% 1RM)	(~64.8% 1RM)	(~64.1% 1RM)	(~70.1% 1RM)	(~70.6% 1RM)	(~78.8% 1RM)
PV55%	0.78 ± 0.02	0.70 ± 0.03	0.70 ± 0.02	0.69 ± 0.03	0.69 ± 0.02	0.62 ± 0.02	0.61 ± 0.03	0.62 ± 0.02
	(~60.1% 1RM)	(~65% 1RM)	(~65% 1RM)	(~65.8% 1RM)	(~65.4% 1RM)	(~69.9% 1RM)	(~70.8% 1RM)	(~70.1% 1RM)
<b>Total</b>								
PV (%)								
PV15%								15.6 ± 2.4
PV40%								38.6 ± 4.7
PV55%								52.1 ± 8.3
VMP promedio (m·s <sup>-1</sup> )								
PV15%								0.75 ± 0.10
PV40%								0.76 ± 0.10
PV55%								0.75 ± 0.09
VMP promedio (m·s <sup>-1</sup> )								0.75 ± 0.09

PV: Pérdida de velocidad; VMP: Velocidad media propulsiva; 1RM: Una repetición máxima

## **G. Instrumental de Evaluación**

### ***Máquina tipo Smith***

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio I.1** (Apartado 4.4.1.G).

### ***Transductor lineal de velocidad***

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio I.1**. (Apartado 4.4.1.G).

### ***Plataforma dinamométrica***

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio I.2**. (Apartado 4.5.1.G).

### ***Electromiógrafo***

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 5.4.G).

### ***Plataforma de salto***

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 5.4.G).

### ***Células fotoeléctricas***

Las características de este instrumento ya han sido descritas previamente en la metodología del **Estudio II** (Apartado 5.4.G).

## H. Plan de trabajo

El presente estudio tuvo una duración total de 10 semanas. Durante ese tiempo, cada participante realizó un total de 2 sesiones de evaluación y 16 sesiones de entrenamiento de fuerza. Los test fueron realizados en una sola sesión siguiendo el mismo orden (test de carrera en 20 m, test de salto vertical CMJ, test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de sentadilla completa, test de fatiga muscular en el ejercicio de sentadilla completa, isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de press de banca, test de fatiga muscular en el ejercicio de press de banca), en las mismas instalaciones, a la misma hora del día ( $\pm 1$ h) para cada participante, en las mismas condiciones ambientales y bajo la supervisión de los mismos evaluadores. Antes de la realización de los test físicos, los participantes tenían que llegar al laboratorio y después de 20 min sentados fueron requeridos para tomar las muestras de sangre necesarias para el análisis bioquímico. Durante la evaluación inicial se registró la última comida realizada, la hora a la que la realizaron y las horas de sueño previas de cada participante, y se pidió que volvieran a repetir la misma rutina durante el post-test para controlar la influencia de estos factores sobre las concentraciones hormonales y el rendimiento físico. Para las sesiones de evaluación, se establecieron 4 turnos (10:00 h, 12:00 h, 16:00 h, 18:00 h) en cada uno de los cuales se evaluó a 3 participante. Por tanto, se necesitaron 3 días consecutivos para la evaluación de los 36 participantes. Las sesiones de entrenamiento tuvieron una duración de ~1 h y se realizaron siempre en el mismo orden: sentadilla completa y press de banca. El tiempo de recuperación entre cada ejercicio fue de ~15 min. Se establecieron 4 días (lunes y jueves o martes y viernes) y 8 turnos (10:00 h, 11:00 h, 12:00 h, 13:00 h, 16:00 h, 17:00 h, 18:00 h y 19:00 h) durante cada día para que los participantes pudieran elegir la hora a la que realizar los entrenamientos. Después de la primera semana de entrenamiento, se prestó especial atención a que los participantes realizaran los sucesivos entrenamientos los mismos días y a las mismas horas ( $\pm 1$ h) para intentar eliminar posibles variables contaminantes.

## I. Análisis estadístico

La media y la desviación típica (DT) se calculó a través de métodos estadísticos estandarizados. La fiabilidad relativa fue analizada a través del coeficiente de correlación intraclase (CCI), el cual se calculó utilizando el modelo de un factor con

efectos aleatorios y un intervalo de confianza del 95%. Este modelo es el más exigente, ya que tiene en consideración las diferencias entre las medias de las puntuaciones. La fiabilidad absoluta se calculó usando el error estándar de medida ( $SEM = \sqrt{\text{Media Cuadrática de Error}}$ ). Los valores de SEM fueron expresados como porcentaje de sus respectivas medias a través del CV (Atkinson & Nevill, 1998). Los cálculos de fiabilidad se realizaron con los valores obtenidos en el pre-test. La homogeneidad de varianzas entre grupos se verificó usando el test de Levene. Para comprobar la normalidad de la distribución en cada una de las variables se utilizó la prueba de Shapiro-Wilk. Para analizar los cambios producidos por el entrenamiento sobre cada una de las variables analizadas se utilizó un ANOVA factorial 3x2 con medidas repetidas usando un factor entre-grupos ( $PV_{\text{menor}}$  vs.  $PV_{\text{media}}$  vs.  $PV_{\text{mayor}}$ ) y un factor intra-grupo (Pre-test vs. Post-test). Para analizar la evolución del CMJ y la 1RM en cada semana se utilizó un ANOVA factorial 3x10 con medidas repetidas usando un factor entre-grupos ( $PV_{\text{menor}}$  vs.  $PV_{\text{media}}$  vs.  $PV_{\text{mayor}}$ ) y un factor intra-grupo (Pre-test vs. semanas 1-8 vs. Post-test). Para analizar las diferencias entre grupos se calculó el porcentaje de cambio para cada variable  $[(\text{Post} - \text{Pre}/\text{Pre}) \times 100]$  y se aplicó un ANOVA de un factor con el correspondiente test de corrección de *Bonferroni* para detectar las diferencias entre las medias. Además del análisis de hipótesis nula, se realizó un análisis basado en la magnitud de cambio (Batterham & Hopkins, 2006; Hopkins, et al., 2009). Las diferencias estandarizadas o los tamaños del efecto (TE) para los cambios en las variables dependientes entre-grupos ( $PV_{\text{menor}}$  vs.  $PV_{\text{media}}$  vs.  $PV_{\text{mayor}}$ ) se calcularon usando los valores de la DT del Pre-test combinada de los 2 grupos comparados (Batterham & Hopkins, 2006; Hopkins, Marshall, Batterham, & Hanin, 2009). Para las comparaciones entre grupos, se calculó la probabilidad de que los valores reales (desconocido) para cada grupo experimental fuesen *beneficioso/mejor* [i.e., mayor que el mínimo cambio apreciable ( $0.2 \times \text{DT entre-sujetos del Pre-test}$ , basado en el principio de TE de Cohen)], *no claro*, *perjudicial/peor* para el rendimiento. La probabilidad cuantitativa de que un efecto fuese *beneficioso/mejor* o *perjudicial/peor* se calculó cualitativamente como sigue: <1%, casi seguro que no; 1-5%, muy poco probable; 5-25%, poco probable; 25-75%, posible; 75-95%, probable; 95-99%, muy probable; y >99%, casi seguro. Si las probabilidades de tener un efecto *beneficioso/mejor* o *perjudicial/peor* fueron ambas >10%, la verdadera diferencia fue evaluada como *no clara* (Batterham & Hopkins, 2006; Hopkins, et al., 2009). Para todas las pruebas de hipótesis nula, el nivel de significación estadístico se fijó en el 5% ( $P \leq 0.05$ ) y todos los



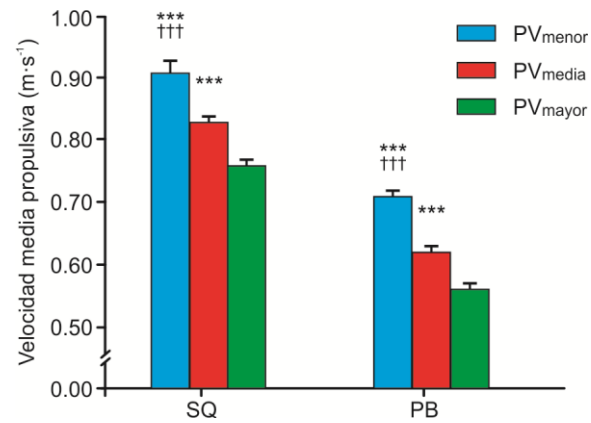
análisis fueron realizados utilizando el paquete de software estadístico SPSS versión 17.0 (SPSS, Chicago, IL). Los análisis basados en la magnitud de cambio se llevaron a cabo utilizando la hoja de Excel creada por Hopkins (Hopkins, 2006).



## 6.5.2. Resultados

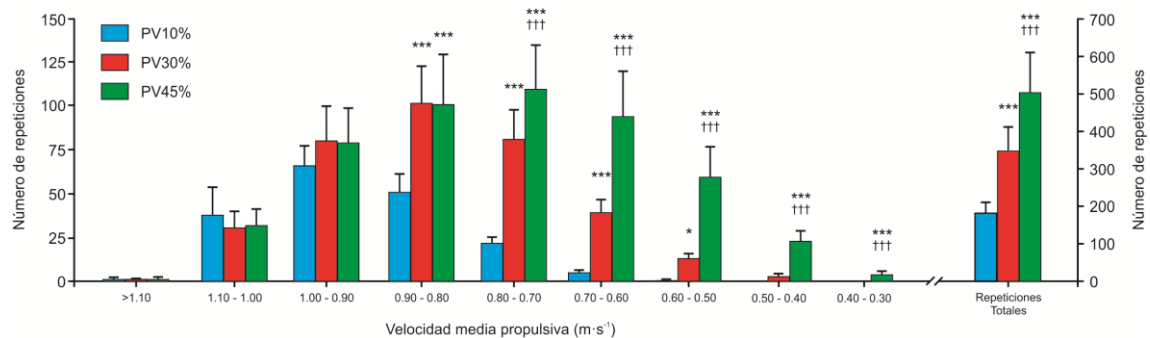
### ***Análisis del entrenamiento realizado***

En las **Tablas 46 y 47** aparece un resumen con las características de las sesiones de entrenamiento realizadas en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente. En ellas se puede observar que tanto la mejor VMP de la primera serie de entrenamiento (intensidad relativa) como el promedio de pérdida de VMP de las tres series realizadas en cada sesión se ajustaron a lo *programado*. La  $VMP_{mejor}$  de la primera serie de cada sesión de entrenamiento fue similar para los 3 grupos experimentales. Los participantes del grupo  $PV_{menor}$  entrenaron a una velocidad media significativamente ( $p < 0.001$ ) mayor (SQ:  $0.91 \pm 0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , PB:  $0.71 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) que los participantes del grupo  $PV_{media}$  (SQ:  $0.83 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , PB:  $0.62 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) y  $PV_{mayor}$  (SQ:  $0.76 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , PB:  $0.56 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), mientras que los participantes del grupo  $PV_{media}$  entrenaron a mayor velocidad media ( $p < 0.001$ ) que los del grupo  $PV_{mayor}$  (**Figura 50**). El promedio del número de repeticiones totales realizado con la carga más alta de cada sesión de entrenamiento fue significativamente mayor ( $p < 0.001$ ) en el grupo  $PV_{mayor}$  (SQ:  $501.1 \pm 106.8$ , PB:  $488.8 \pm 76.2$ ) que en los grupos  $PV_{menor}$  (SQ:  $180.7 \pm 29.2$ , PB:  $166.8 \pm 16.1$ ) y  $PV_{media}$  (SQ:  $347.9 \pm 62.3$ , PB:  $372.7 \pm 58.9$ ), mientras que en grupo  $PV_{media}$  realizó un mayor número de repeticiones totales ( $p < 0.001$ ) con la carga más alta que el grupo  $PV_{menor}$ . En la **Figura 51** aparece el número de repeticiones medio realizado por cada grupo experimental en diferentes rangos de velocidad en los ejercicios de sentadilla completa (**Figura 51A**) y press de banca (**Figura 51B**). En ambos ejercicios, en los rangos de velocidad más altos (SQ:  $1.10 - 0.90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , PB:  $0.90 - 0.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) no se encontraron diferencias significativas en el número de repeticiones realizado entre los tres grupos experimentales. Con velocidades inferiores a  $0.90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  en sentadilla completa y  $0.70 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  en press de banca, los participantes de los grupos  $PV_{media}$  y  $PV_{mayor}$  realizaron un mayor número de repeticiones en cada rango de velocidad que los participantes del grupo  $PV_{menor}$ . Además, en los rangos de velocidades de  $0.80 - 0.30 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para la sentadilla completa y  $0.50 - 0.20 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  para el press de banca, los participantes del grupo  $PV_{mayor}$  realizaron un mayor número de repeticiones que los del grupo  $PV_{media}$ .

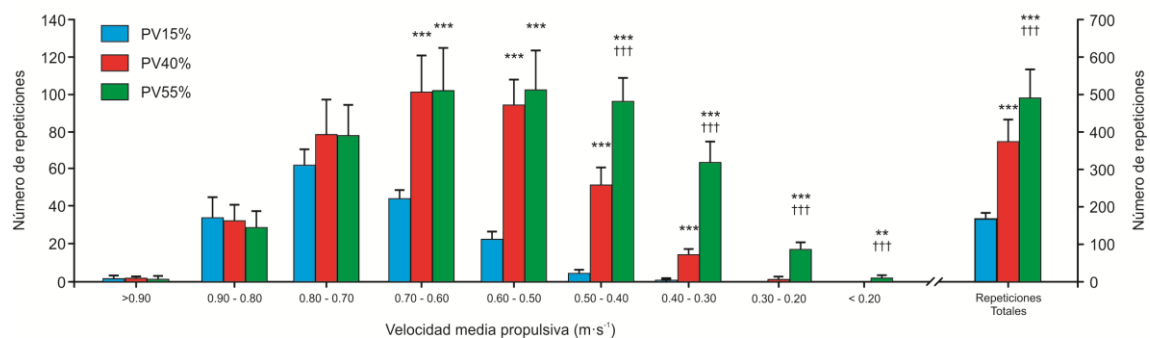


**Figura 50.** Velocidad media de entrenamiento para cada grupo (PV<sub>menor</sub>, PV<sub>media</sub> y PV<sub>mayor</sub>) en los ejercicios de **sentadilla completa** y **press de banca**. Las barras de error representan la DT. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV<sub>mayor</sub>: \*\*\* p < 0.001. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV<sub>media</sub>: ††† p < 0.001.

A



B



**Figura 51.** Número de repeticiones realizado en cada rango de velocidad y número de repeticiones totales completadas por cada grupo (PV<sub>menor</sub>, PV<sub>media</sub> y PV<sub>mayor</sub>) para los ejercicios de **sentadilla completa** (A) y **press de banca** (B). Las barras de error representan la DT. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV<sub>menor</sub>: \* p < 0.05; \*\* p < 0.01; \*\*\* p < 0.001. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV<sub>media</sub>: ††† p < 0.001.

### **Cambios en la fuerza y la resistencia muscular**

Todos los grupos experimentales mostraron un aumento significativo en las variables  $1RM_{est}$ ,  $VMP_{CC}$ ,  $VMP_{CB}$ ,  $VMP_{CA}$  y test de fatiga tanto en el ejercicio de sentadilla completa (**Tabla 48**) como en el de press de banca (**Tabla 50**), excepto el grupo  $PV_{mayor}$  el cual no mostró cambios significativos en la variable  $VMP_{CB}$  en el ejercicio de sentadilla completa (**Tabla 48**).

Para el ejercicio de sentadilla completa, se encontró una interacción significativa '*tiempo x grupo*' en las variables  $VMP_{CC}$  ( $p < 0.05$ ) y  $VMP_{CB}$  ( $p < 0.01$ ), con los grupos  $PV10\%$  y  $PV30\%$  mostrando mayores incrementos que  $PV45\%$  en ambas variables (**Tabla 49**). No hubo interacción '*tiempo x grupo*' en las variables  $1RM_{est}$ ,  $VMP_{CA}$  y test de fatiga. El grupo  $PV10\%$  mostró un *probable* y *muy probable* mayor incremento en las variables  $1RM_{est}$  y  $VMP_{CA}$ , respectivamente, que el grupo  $PV45\%$  (**Tabla 49**). El grupo  $PV30\%$  resultó en un *posible* y *probable* efecto más beneficioso que el grupo  $PV45\%$  en las variables  $1RM_{est}$  y  $VMP_{CA}$ . Las diferencias entre-grupos en el test de fatiga fueron *no claras*.

No hubo interacción significativa '*tiempo x grupo*' en ninguna de las variables analizadas durante el test incremental en el ejercicio de press de banca. El análisis de las diferencias estandarizadas mostró que  $PV40\%$  resultó en un *posible* ( $1RM_{est}$ ,  $VMP_{CC}$  y test de fatiga) y *probable* ( $VMP_{CA}$ ) mayor efecto que  $PV15\%$ , y un *posible* y *probable* mayor efecto sobre las variables  $1RM_{est}$  y  $VMP_{CB}$ , respectivamente, que  $PV55\%$  (**Tabla 51**). Las diferencias entre  $PV45\%$  y  $PV10\%$  fueron *posibles* en las variables  $1RM_{est}$  y  $VMP_{CA}$  y test de fatiga en favor de  $PV45\%$ , mientras que para las variables  $VMP_{CC}$  y  $VMP_{CB}$  las diferencias fueron *no claras*.

**Tabla 48.** Cambios en las variables de rendimiento analizadas desde el pre-test al post-test para cada grupo de entrenamiento en el ejercicio de **sentadilla completa**.

	PV10%				PV30%				PV45%			
	Pre	Post	$\Delta$ (%)	TE	Pre	Post	$\Delta$ (%)	TE	Pre	Post	$\Delta$ (%)	TE
<b>CMJ</b> (cm)	39.1 $\pm$ 5.7	43.8 $\pm$ 6.6 ***	11.7	0.72	39.8 $\pm$ 4.7	40.8 $\pm$ 4.3	2.7	0.20	39.0 $\pm$ 6.3	41.0 $\pm$ 6.3 *	5.2	0.26
<b>T10</b> (s)	1.77 $\pm$ 0.07	1.71 $\pm$ 0.06 *	-3.1	0.77	1.75 $\pm$ 0.09	1.72 $\pm$ 0.05	-2.1	0.36	1.75 $\pm$ 0.12	1.75 $\pm$ 0.09	-0.1	0.01
<b>T20</b> (s)	3.06 $\pm$ 0.10	2.99 $\pm$ 0.08 **	-2.4	0.70	3.04 $\pm$ 0.15	2.97 $\pm$ 0.09 *	-2.1	0.39	3.05 $\pm$ 0.13	3.03 $\pm$ 0.13	-0.5	0.11
<b>1RM<sub>est</sub></b> (kg)	96.0 $\pm$ 14.0	117.4 $\pm$ 17.8 ***	22.2	1.22	97.4 $\pm$ 19.2	118.9 $\pm$ 22.6 ***	22.1	1.05	96.9 $\pm$ 15.0	111.8 $\pm$ 19.2 ***	15.1	0.86
<b>VMP<sub>cc</sub></b> (m·s <sup>-1</sup> )	0.95 $\pm$ 0.04	1.10 $\pm$ 0.06 ***	15.8	2.97	0.98 $\pm$ 0.07	1.12 $\pm$ 0.10 ***	14.6	1.85	0.97 $\pm$ 0.08	1.05 $\pm$ 0.10 ***	7.5	0.80
<b>VMP<sub>cb</sub></b> (m·s <sup>-1</sup> )	1.25 $\pm$ 0.04	1.35 $\pm$ 0.06 ***	8.5	2.38	1.27 $\pm$ 0.07	1.37 $\pm$ 0.10 ***	7.4	1.21	1.28 $\pm$ 0.06	1.30 $\pm$ 0.07	1.9	0.35
<b>VMP<sub>ca</sub></b> (m·s <sup>-1</sup> )	0.67 $\pm$ 0.03	0.87 $\pm$ 0.06 ***	28.3	4.41	0.71 $\pm$ 0.04	0.89 $\pm$ 0.11 ***	25.8	3.51	0.68 $\pm$ 0.04	0.80 $\pm$ 0.08 ***	18.5	2.46
<b>Test de fatiga</b>	11.6 $\pm$ 3.5	17.6 $\pm$ 4.2 ***	54.4	1.44	12.0 $\pm$ 4.3	17.6 $\pm$ 4.2 **	51.5	1.06	12.9 $\pm$ 6.0	18.3 $\pm$ 6.3 **	44.2	0.81

TE: Tamaño del efecto intra-grupo;  $\Delta$ : Cambios pre-post entrenamiento; IC: Intervalo de confianza; PV10%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 10% (n = 11); PV30%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 30% (n = 11); PV45%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 45% (n = 12); 1RM<sub>est</sub>: Una repetición máxima estimada; CMJ: Altura de salto con contramovimiento, T10: Tiempo en recorrer 10 m; T20: Tiempo en recorrer 20 m; VMP<sub>cc</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva con todas las cargas comunes durante el Pre- y el Post-test; VMP<sub>cb</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas iguales o inferiores al ~60% 1RM (VMP  $\geq$  1.00 m·s<sup>-1</sup>) en el pre test; VMP<sub>ca</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas superiores al ~60% 1RM (VMP < 1.00 m·s<sup>-1</sup>) en el pre-test. Diferencias significativas intra-grupo: \* p < 0.05, \*\* p < 0.01, \*\*\* p < 0.001.

**Tabla 49.** Comparaciones entre-grupos en las variables de rendimiento analizadas desde el pre-test al post-test en el ejercicio de **sentadilla completa**.

Cambios observados para Post vs. Pre					
	Interacción 'tiempo x grupo'	p-valor entre grupos	TE entre-grupos (IC 90%)	Probabilidad de un mejor efecto *	
<b>CMJ (cm)</b>	0.007				
PV10% vs. PV30%		0.012	0.60 (0.27 a 0.93)	97/3/0	Muy probable
PV10% vs. PV45%		0.085	0.35 (0.12 a 0.58)	86/14/0	Probable
PV30% vs. PV45%		1.000	-0.15 (-0.45 a 0.15)	3/59/38	Muy poco probable
<b>T10 (s)</b>	0.237				
PV10% vs. PV30%		1.000	0.21 (-0.29 a 0.72)	52/40/9	Posible
PV10% vs. PV45%		0.250	0.52 (0.00 a 1.05)	85/14/1	Probable
PV30% vs. PV45%		0.739	0.31 (-0.22 a 0.88)	64/30/6	Posible
<b>T20 (s)</b>	0.190				
PV10% vs. PV30%		1.000	0.07 (-0.28 a 0.42)	27/64/10	No claro
PV10% vs. PV45%		0.267	0.47 (0.00 a 0.94)	84/15/1	Probable
PV30% vs. PV45%		0.474	0.32 (-0.12 a 0.76)	68/29/3	Posible
<b>1RM<sub>est</sub> (Kg)</b>	0.190				
PV10% vs. PV30%		1.000	0.00 (-0.38 a 0.38)	19/62/19	No claro
PV10% vs. PV45%		0.365	0.37 (0.03 a 0.71)	80/20/0	Probable
PV30% vs. PV45%		0.330	0.34 (-0.05 a 0.73)	73/26/1	Posible
<b>VMP<sub>CC</sub> (m·s<sup>-1</sup>)</b>	0.014				
PV10% vs. PV30%		1.000	0.17 (-0.62 a 0.97)	48/31/21	No claro
PV10% vs. PV45%		0.022	1.02 (0.57 a 1.46)	100/0/0	Casi seguro
PV30% vs. PV45%		0.050	0.78 (0.16 a 1.40)	94/5/1	Probable
<b>VMP<sub>CB</sub> (m·s<sup>-1</sup>)</b>	0.009				
PV10% vs. PV30%		1.000	0.22 (-0.52 a 0.95)	51/32/17	No claro
PV10% vs. PV45%		0.012	1.34 (0.71 a 1.98)	100/0/0	Casi seguro
PV30% vs. PV45%		0.041	0.95 (0.25 a 1.65)	96/3/1	Muy probable
<b>VMP<sub>CA</sub> (m·s<sup>-1</sup>)</b>	0.100				
PV10% vs. PV30%		1.000	0.30 (-0.71 a 1.31)	56/23/20	No claro
PV10% vs. PV45%		0.134	1.38 (0.34 a 2.22)	97/2/1	Muy probable
PV30% vs. PV45%		0.346	0.84 (-0.16 a 1.85)	86/10/4	Probable
<b>Test de fatiga</b>	0.935				
PV10% vs. PV30%		1.000	0.05 (-0.75 a 0.85)	38/33/29	No claro
PV10% vs. PV45%		1.000	0.18 (-0.38 a 0.73)	47/40/13	No claro
PV30% vs. PV45%		1.000	0.12 (-0.57 a 0.81)	42/36/22	No claro

TE: Tamaño del efecto; IC: Intervalo de confianza; PV10%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 10% (n = 11); PV30%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 30% (n = 11); PV45%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 45% (n = 12); 1RM<sub>est</sub>: Una repetición máxima estimada; CMJ: Altura de salto con contramovimiento, T10: Tiempo en recorrer 10 m; T20: Tiempo en recorrer 20 m; VMP<sub>CC</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva con todas las cargas comunes durante el Pre- y el Post-test; VMP<sub>CB</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas iguales o inferiores al ~60% 1RM (VMP  $\geq$  1.00 m·s<sup>-1</sup>) en el pre test; VMP<sub>CA</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas superiores al ~60% 1RM (VMP < 1.00 m·s<sup>-1</sup>) en el pre-test\* Nota: Las diferencias se presentan como mejoras del primer grupo con respecto al segundo grupo (i.e., PV10% vs. PV30%), por lo que las diferencias positivas o negativas son en la misma dirección.

**Tabla 50.** Cambios en las variables de rendimiento analizadas desde el pre-test al post-test para cada grupo de entrenamiento en el ejercicio de **press de banca**.

	PV15%				PV40%				PV55%			
	Pre	Post	$\Delta$ (%)	TE	Pre	Post	$\Delta$ (%)	TE	Pre	Post	$\Delta$ (%)	TE
<b>1RM<sub>test</sub></b> (kg)	72.3 ± 12.1	78.5 ± 12.8 ***	8.6	0.45	70.1 ± 14.2	79.1 ± 15.8 ***	12.9	0.55	73.2 ± 11.8	80.8 ± 12.7 ***	10.6	0.56
<b>VMP<sub>cc</sub></b> (m·s <sup>-1</sup> )	0.73 ± 0.06	0.81 ± 0.07 ***	10.4	1.06	0.71 ± 0.06	0.82 ± 0.08 ***	14.8	1.62	0.71 ± 0.07	0.80 ± 0.09 ***	12.3	1.05
<b>VMP<sub>cb</sub></b> (m·s <sup>-1</sup> )	1.07 ± 0.05	1.13 ± 0.05 **	5.9	1.12	1.06 ± 0.05	1.14 ± 0.08 ***	7.2	1.24	1.07 ± 0.06	1.12 ± 0.10 *	4.1	0.62
<b>VMP<sub>ca</sub></b> (m·s <sup>-1</sup> )	0.46 ± 0.04	0.55 ± 0.08 ***	18.3	1.70	0.47 ± 0.06	0.60 ± 0.08 ***	26.5	1.75	0.47 ± 0.04	0.59 ± 0.08 ***	23.7	2.66
<b>Test de fatiga</b>	18.6 ± 4.9	21.0 ± 4.7 *	13.5	0.43	20.3 ± 5.7	24.1 ± 7.2 **	18.9	0.57	21.3 ± 3.8	26.2 ± 4.9 ***	22.6	1.08

TE: Tamaño del efecto intra-grupo;  $\Delta$ : Cambios pre-post entrenamiento; IC: Intervalo de confianza; PV15%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 15% (n = 11); PV40%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 40% (n = 11); PV55%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 55% (n = 12); 1RM<sub>test</sub>: Una repetición máxima estimada; VMP<sub>cc</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva con todas las cargas comunes durante el Pre- y el Post-test; VMP<sub>cb</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas iguales o inferiores al ~60% 1RM (VMP ≥ 0.80 m·s<sup>-1</sup>) en el pre test; VMP<sub>ca</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas superiores al ~60% 1RM (VMP < 0.80 m·s<sup>-1</sup>) en el pre-test. Diferencias significativas intra-grupo: \* p < 0.05, \*\* p < 0.01, \*\*\* p < 0.001.



**Tabla 51.** Comparaciones entre-grupos en las variables de rendimiento analizadas desde el pre-test al post-test en el ejercicio de **press de banca**.

	Cambios observados para Post vs. Pre				
	Interacción <i>'tiempo x grupo'</i>	p-valor entre grupos	TE entre-grupos (IC 90%)	Probabilidad de un mejor efecto *	
<b>1RM<sub>est</sub> (Kg)</b>	0.438				
PV15% vs. PV40%		0.478	-0.19 (-0.42 a 0.03)	0/52/58	Casi seguro que no
PV15% vs. PV55%		1.000	-0.10 (-0.35 a 0.14)	2/73/25	Muy poco probable
PV40% vs. PV55%		1.000	0.10 (-0.16 a 0.37)	26/70/3	Posible
<b>VMP<sub>CC</sub> (m·s<sup>-1</sup>)</b>	0.528				
PV15% vs. PV40%		0.759	-0.44 (-1.09 a 0.21)	5/21/73	Muy poco probable
PV15% vs. PV55%		1.000	-0.17 (-0.70 a 0.37)	12/42/46	No claro
PV40% vs. PV55%		1.000	0.22 (-0.42 a 0.87)	53/34/14	No claro
<b>VMP<sub>CB</sub> (m·s<sup>-1</sup>)</b>	0.492				
PV15% vs. PV40%		1.000	-0.24 (-1.01 a 0.53)	17/30/54	No claro
PV15% vs. PV55%		1.000	0.31 (-0.40 a 1.01)	60/28/12	No claro
PV40% vs. PV55%		0.654	0.51 (-0.24 a 1.25)	76/18/6	Probable
<b>VMP<sub>CA</sub> (m·s<sup>-1</sup>)</b>	0.372				
PV15% vs. PV40%		0.465	-0.58 (-1.30 a 0.15)	4/15/81	Muy poco probable
PV15% vs. PV55%		1.000	-0.50 (-1.34 a -0.33)	8/19/73	Poco probable
PV40% vs. PV55%		1.000	0.21 (-0.64 a 1.06)	51/28/21	No claro
<b>Test de fatiga</b>	0.316				
PV15% vs. PV40%		1.000	-0.16 (-0.56 a 0.25)	7/50/43	Poco probable
PV15% vs. PV55%		0.718	-0.30 (-0.74 a 0.13)	3/31/66	Muy poco probable
PV40% vs. PV55%		1.000	-0.12 (-0.66 a 0.41)	15/4/40	No claro

TE: Tamaño del efecto; IC: Intervalo de confianza; PV15%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 15% (n = 11); PV40%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 40% (n = 11); PV55%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 55% (n = 12); 1RM<sub>est</sub>: Una repetición máxima estimada; VMP<sub>CC</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva con todas las cargas comunes durante el Pre- y el Post-test; VMP<sub>CB</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas iguales o inferiores al ~60% 1RM (VMP  $\geq$  0.80 m·s<sup>-1</sup>) en el pre test; VMP<sub>CA</sub>: Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas superiores al ~60% 1RM (VMP < 0.80 m·s<sup>-1</sup>) en el pre-test. \* Nota: Las diferencias se presentan como mejoras del primer grupo con respecto al segundo grupo (i.e., PV10% vs. PV30%), por lo que las diferencias positivas o negativas son en la misma dirección.

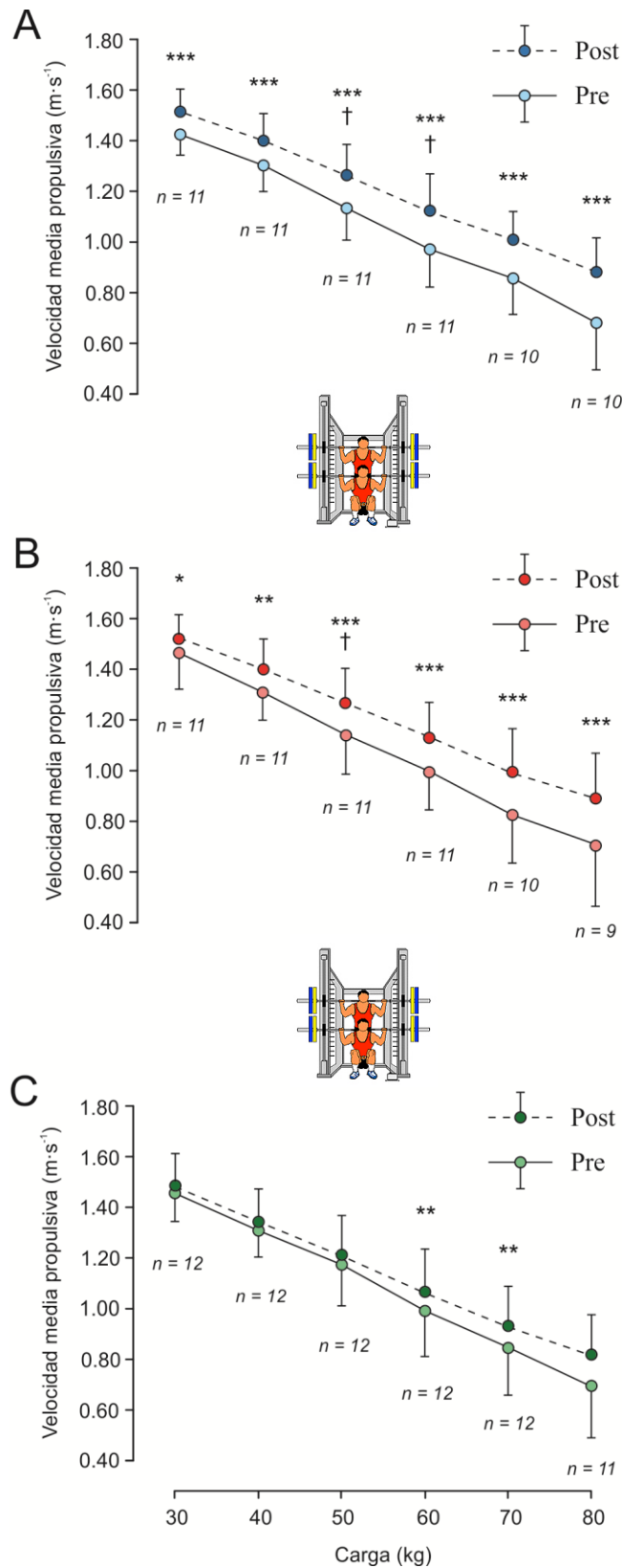
### **Cambios en el salto vertical y la capacidad de aceleración**

El grupo PV10% mostró cambios significativos en el salto vertical ( $p < 0.001$ ) y la capacidad de aceleración ( $p < 0.05 - 0.01$ ), mientras que los grupos PV30% y PV45% solo resultaron en cambios significativos en las variables T20 ( $p < 0.05$ ) y CMJ ( $p < 0.05$ ), respectivamente (**Tabla 48**). Hubo interacción significativa 'tiempo x grupo' en el CMJ, con el grupo PV10% mostrando incrementos significativamente ( $p < 0.012$ ) mayores comparado con PV30% (**Tabla 49**). Además, el grupo PV10% mostró un *probable* efecto más beneficioso que PV45% en las variables CMJ, T10 y T20, y un *posible* mayor efecto que PV30% en T10. El grupo PV30% presentó un *posible* efecto más beneficioso que PV45% en las variables T10 y T20.

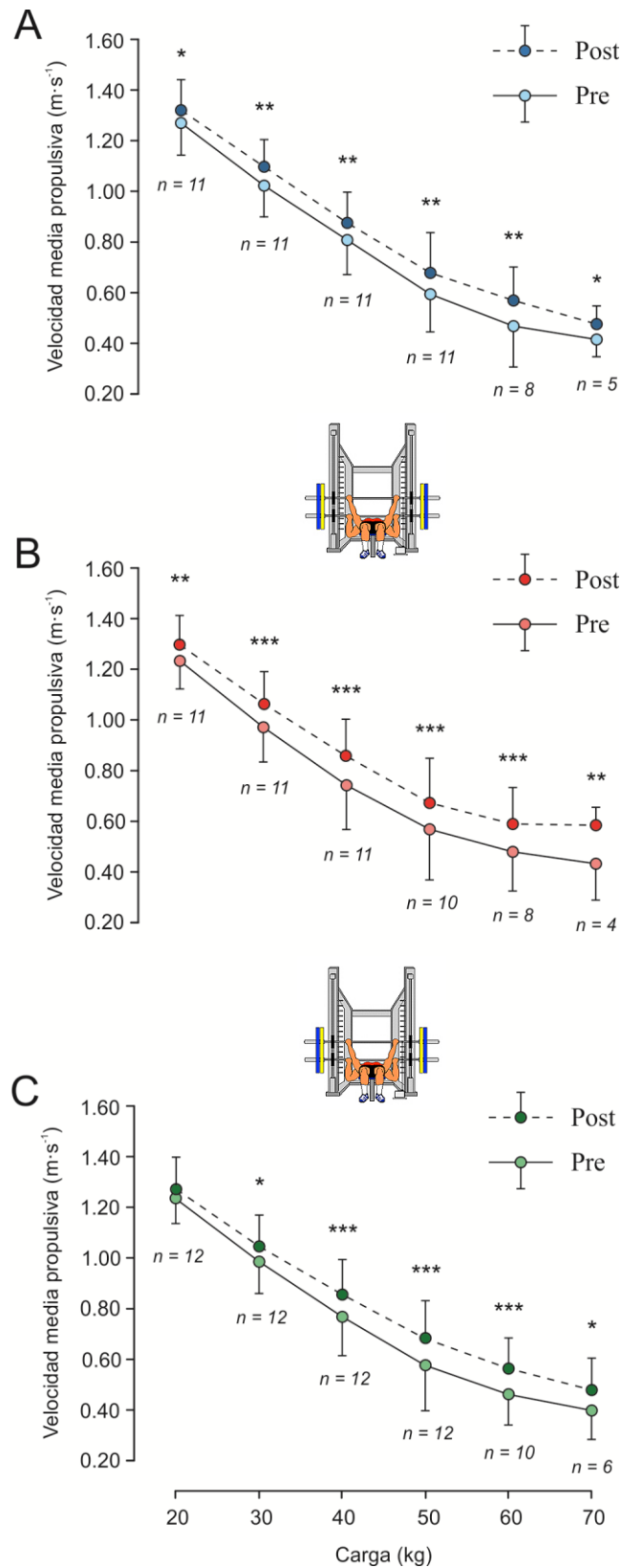
### **Cambios en la curva Carga - Velocidad**

Los cambios en las curvas carga-velocidad de cada uno de los grupos para los ejercicios de sentadilla completa y press de banca aparecen en las **Figuras 52 y 53**, respectivamente. En el ejercicio de sentadilla completa, los grupos PV10% (~6 - 34%;  $p < 0.001$ ) y PV30% (~4 - 34%;  $p < 0.05 - 0.001$ ) mostraron un aumento significativo en la VMP alcanzada ante cada una de las cargas analizadas (30 - 80 kg), mientras que el grupo PV45% solo alcanzó cambios significativos en VSQ<sub>60</sub> (7.6%;  $p < 0.01$ ) y VSQ<sub>70</sub> (11.3%;  $p < 0.01$ ). Hubo interacción significativa '*tiempo x grupo*' en las variables VSQ<sub>50</sub> y VSQ<sub>60</sub>. La comparación entre-grupos mostró que los incrementos en la VMP con las carga de 50 y 60 kg fueron significativamente ( $p < 0.05$ ) mayores en el grupo PV10% comparado con el grupo PV45%, mientras que las diferencias entre PV30% y PV45% solo fueron significativas ( $p < 0.05$ ) en VSQ<sub>50</sub>. Para el resto de cargas analizadas no hubo diferencias significativas entre los tres grupos experimentales. El grupo PV10% mostró un *probable* (sobre VSQ<sub>30,40</sub>) y un *posible* (sobre VSQ<sub>70,80</sub>) mayor incremento que el grupo PV45%, mientras que los incrementos en PV30% con respecto a PV45% fueron *posiblemente* mayores para VSQ<sub>30</sub> y VSQ<sub>60</sub> y *probablemente* mayores para VSQ<sub>40</sub> y VSQ<sub>70</sub>. Las diferencias entre PV10% y PV30% fueron *no claras* para todas las cargas excepto para VSQ<sub>30</sub> y VSQ<sub>60</sub>, las cuales fueron *posiblemente* mayores en favor de PV10%.

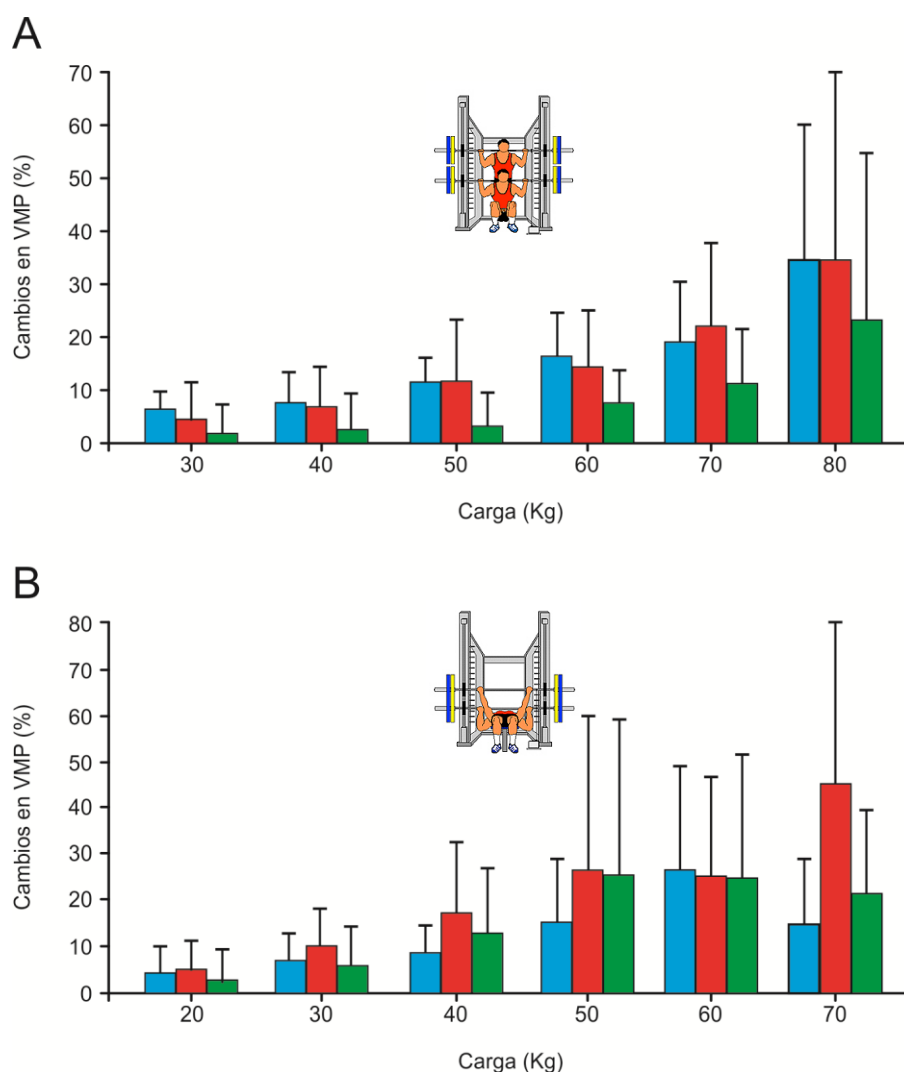
En el ejercicio de press de banca, los grupos PV15% (~4 - 26%;  $p < 0.05 - 0.01$ ) y PV40% (~5 - 45%;  $p < 0.05 - 0.001$ ) mostraron un aumento significativo en la VMP ante las distintas cargas analizadas (20 - 70 kg). El grupo PV55% (~3 - 25%;  $p < 0.05 - 0.001$ ) también obtuvo incrementos significativos en todas las cargas excepto con 20kg. No hubo interacción '*tiempo x grupo*' para ninguna de las cargas estudiadas. El análisis de las diferencias estandarizadas entre-grupos indicó que el grupo PV40% mostró un *posible* mayor aumento en VPB<sub>20,30,40</sub> que PV15% y PV55%, mientras que el grupo PV45% resultó en un *posible* efecto más beneficioso que PV15% en la VMP ante 40 y 50 kg.



**Figura 52.** Curva carga-velocidad en el ejercicio de **sentadilla completa** obtenida para los grupos PV10% (**A**), PV30% (**B**) y PV45% (**C**) antes y después de las 8 semanas de entrenamiento. Las barras de error representan la DT. Diferencias estadísticamente significativas intra-grupo: \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*\*\*  $p < 0.001$ . Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV45%: †  $p < 0.05$ .



**Figura 53.** Curva carga-velocidad en el ejercicio de **press de banca** obtenida para los grupos PV15% (**A**), PV40% (**B**) y PV55% (**C**) antes y después de las 8 semanas de entrenamiento. Las barras de error representan la DT. Diferencias estadísticamente significativas intra-grupo: \*  $p < 0.05$ ; \*\*  $p < 0.01$ ; \*\*\*  $p < 0.001$ .



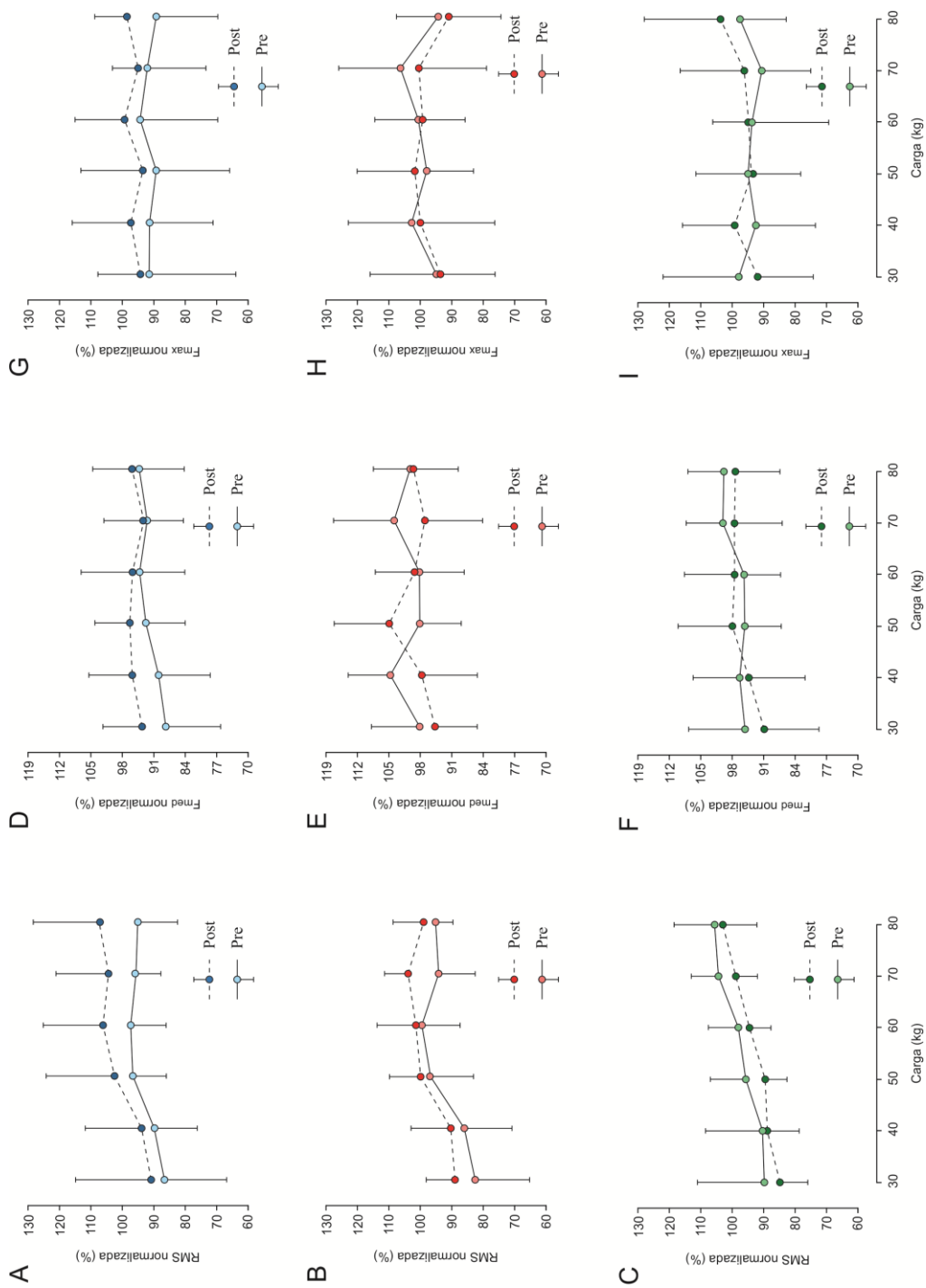
**Figura 54.** Porcentaje de cambios en la VMP para cada una de las cargas analizadas en el ejercicio de **sentadilla completa (A)** y **press de banca (B)** obtenidos para los grupos PV<sub>menor</sub> (Azul), PV<sub>media</sub> (Rojo) y PV<sub>mayor</sub> (Verde) antes y después de las 8 semanas de entrenamiento. Las barras de error representan la DT.

### **Cambios en la curva Carga - EMG**

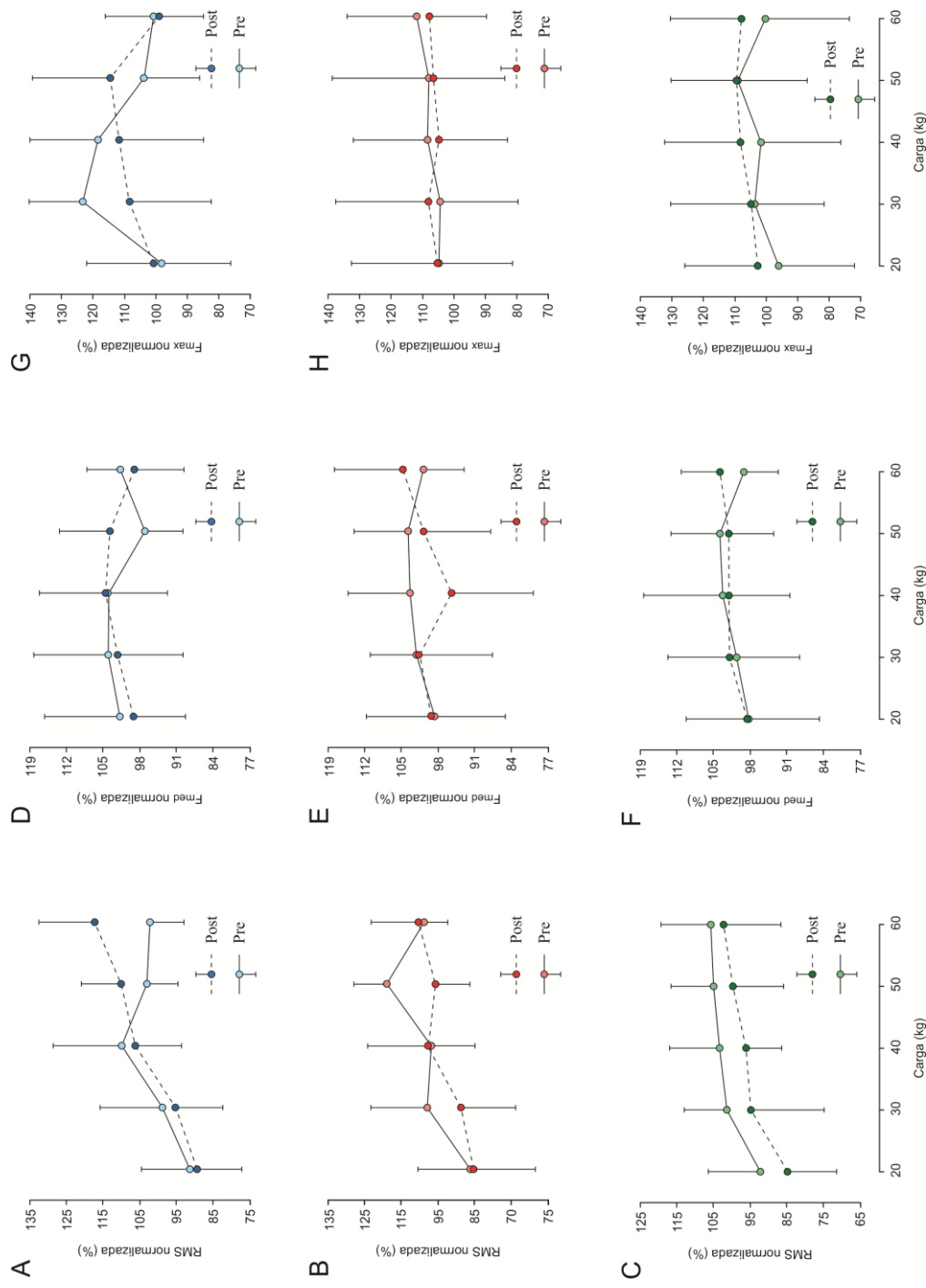
En las **Figuras 55 y 56** aparecen los cambios en las diferentes variables de EMG analizadas para cada grupo en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente. No hubo interacción '*tiempo x grupo*' para ninguna de las variables de EMG en ninguna de las cargas estudiadas, ni en el ejercicio de sentadilla completa ni en el de press de banca. Ninguno de los tres grupos experimentales mostró cambios intra-grupo estadísticamente significativos después del entrenamiento en ninguno de los dos ejercicios evaluados. Durante el ejercicio de sentadilla completa, aunque no fueron

significativos, los grupos PV10% y PV30% mostraron mayores valores de RMS durante el post-test (**Figura 55A y 55B**), mientras que para el grupo PV45%, los valores de RMS durante el post-test fueron inferiores a los del pre-test (**Figura 55C**). El grupo PV10% también mostró una ligera mejora en las variables  $F_{med}$  y  $F_{max}$  con todas las cargas (**Figura 55D y 55G**), mientras que los cambios en estas variables para cada una de las cargas analizadas en los otros dos grupos no mostraron una tendencia clara (**Figura 55E, 55F, 55H y 55I**).

Para el ejercicio de press de banca, solo el grupo PV55% mostró una tendencia clara a obtener menores valores de RMS (**Figura 56C**) y ligeramente mayores valores de  $F_{max}$  (**Figura 56I**) después del entrenamiento para todas las cargas. Para los otros dos grupos experimentales (PV15% y PV40%), no se encontró una tendencia clara para los cambios en RMS,  $F_{med}$  y  $F_{max}$ .



**Figura 55.** Cambios en la RMS (**A, B y C**), la Fmed (**D, E y F**) y la Fmax (**G, H e I**) ante distintas cargas absolutas (30 - 80 kg) en el ejercicio de **sentadilla completa** para los grupos PV10% (**Azul**), PV30% (**Rojo**) y PV45% (**Verde**). Las líneas verticales representan la DT.



**Figura 56.** Cambios en la RMS (A, B y C), la Fmed (D, E y F) y la Fmax (G, H e I) ante distintas cargas absolutas (20 - 60 kg) en el ejercicio de **press de banca** para los grupos PV15% (Azul), PV40% (Rojo) y PV55% (Verde). Las líneas verticales representan la DT.

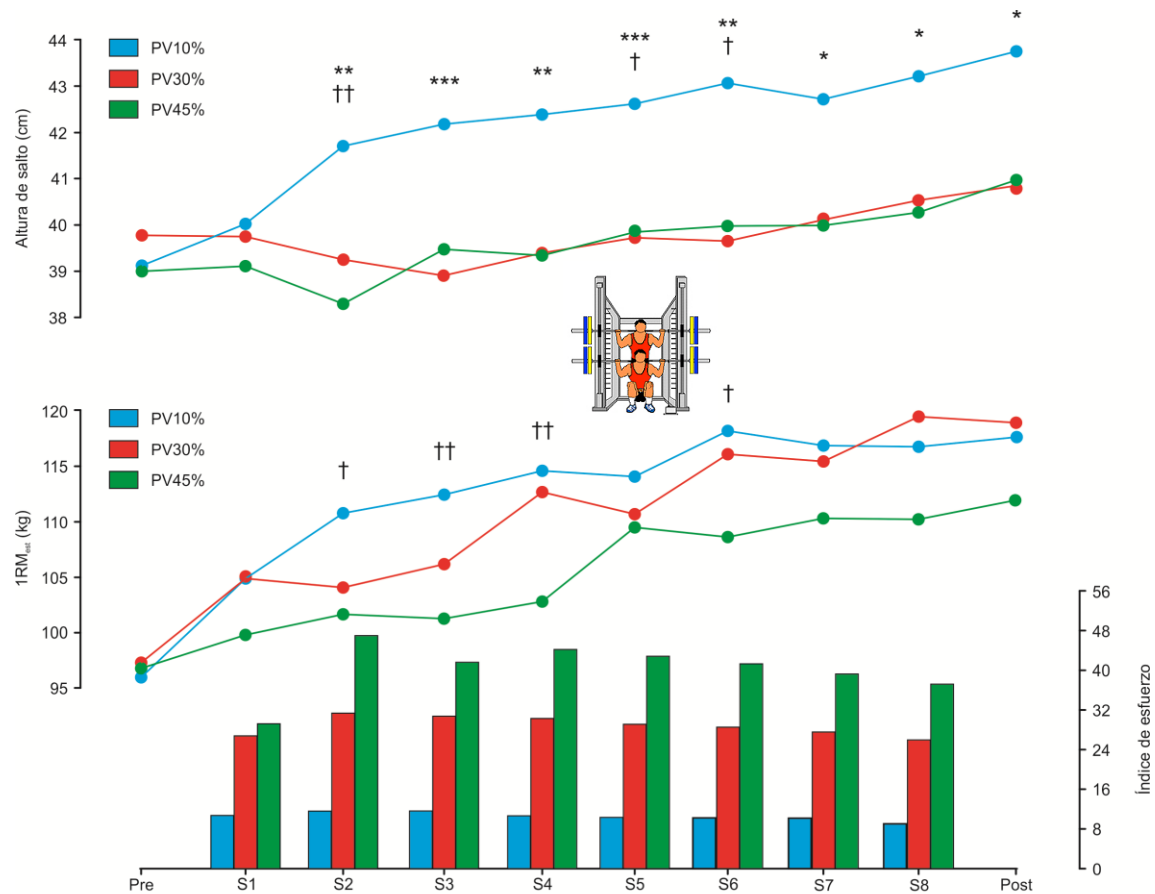


**Evolución de la  $1RM_{est}$  y el CMJ durante el ciclo de entrenamiento**

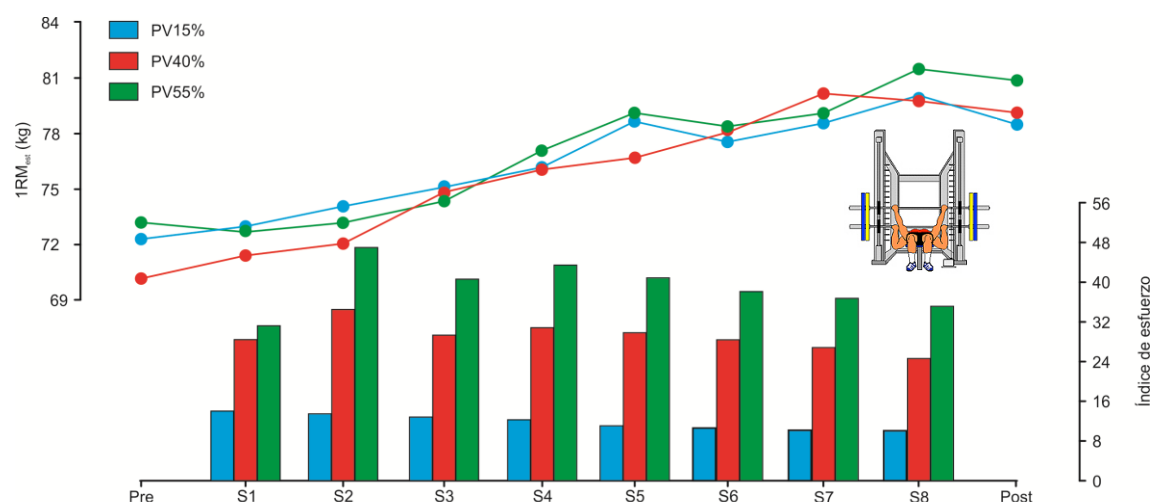
En la **Figura 57** aparece la evolución de la  $1RM_{est}$  y del CMJ durante todo el ciclo de entrenamiento junto con el *índice de esfuerzo* medio de cada semana realizado por cada grupo de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla completa. En el CMJ, el grupo PV10% mostró incrementos significativo (6.8%;  $p < 0.05$ ) con respecto a los valores del pre-test a partir de la segunda semana de entrenamiento. El grupo PV45% solo mostró cambios significativos entre el pre- y el post-test, mientras que el incremento obtenido por el grupo PV30% no fue significativo. En cuanto a la  $1RM_{est}$ , el grupo PV10% también mostró incrementos significativos (15.1%;  $p < 0.001$ ) con respecto a los valores iniciales a partir de la segunda semana de entrenamiento, mientras que los grupos PV30% y PV45% no alcanzaron cambios significativos hasta la tercera (9.2%;  $p < 0.05$ ) y quinta (12.7%;  $p < 0.01$ ) semana, respectivamente.

Hubo interacción '*tiempo x grupo*' en ambas variables ( $1RM_{est}$ :  $p < 0.05$ ; CMJ:  $p < 0.001$ ). A partir de la segunda semana, los cambios en el CMJ con respecto a los valores obtenidos en el pre-test fueron significativamente mayores ( $p < 0.05 - 0.001$ ) para el grupo PV10% (6.8 - 11.7%) en comparación con PV30% (-1.3 - 2.7%). Las diferencias entre PV10% y PV45% fueron significativas en las semanas 2 ( $p < 0.01$ ), 5 ( $p < 0.05$ ) y 6 ( $p < 0.05$ ) en favor de PV10%. Para la  $1RM_{est}$  en el ejercicio de sentadilla completa, el grupo PV10% mostró mayores incrementos con respecto a los valores obtenidos en el pre-test que el grupo PV45% en las semanas 2 ( $p < 0.05$ ), 3 ( $p < 0.01$ ), 4 ( $p < 0.01$ ) y 6 ( $p < 0.05$ ). No hubo diferencias significativas en el resto de comparaciones.

Los cambios semanales en la  $1RM_{est}$  en el ejercicio de press de banca están representados en la **Figura 58**. Los grupos PV15% y PV40% mostraron incrementos significativos ( $p < 0.05$ ) con respecto al pre-test a partir de la tercera semana, mientras que el grupo PV55% necesitó cuatro semana para obtener un incremento significativo ( $p < 0.05$ ). No hubo interacción '*tiempo x grupo*' en la  $1RM_{est}$  semanalmente en el ejercicio de press de banca.



**Figura 57.** Evolución de la altura de salto (CMJ) y de la repetición máxima (estimada a partir de la mejor velocidad alcanzada con la carga más alta utilizada en la segunda sesión de cada semana de entrenamiento) en el ejercicio de **sentadilla completa** obtenida para los grupos PV10% (azul), PV30% (rojo) y PV45% (verde). Las barras representan el *índice de esfuerzo* medio de cada semana para cada grupo de entrenamiento. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV30%: \*\*  $p < 0.01$ ; \*\*\*  $p < 0.001$ . Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV45%: †  $p < 0.05$ ; ††  $p < 0.01$ .



**Figura 58.** Evolución de la repetición máxima (estimada a partir de la mejor velocidad alcanzada con la carga más alta utilizada en la segunda sesión de cada semana de entrenamiento) en el ejercicio de **press de banca** obtenida para los grupos PV15% (azul), PV40% (rojo) y PV55% (verde). Las barras representan el *índice de esfuerzo* medio de cada semana para cada grupo de entrenamiento.

### Cambios bioquímicos

El grupo PV<sub>menor</sub> no mostró cambios significativo en la concentración sanguínea basal de ninguna de las hormonas analizadas ni en la proteína TnT. El grupo PV<sub>media</sub> mostró un descenso significativo ( $p < 0.05$ ) en la concentración sanguínea basal de prolactina, mientras que el grupo PV<sub>mayor</sub> obtuvo un descenso significativo ( $p < 0.05$ ) en la concentración sanguínea basal de GH (**Tabla 52**). Los cambios pre-post entrenamiento para la concentración sanguínea basal del resto de hormonas no fueron significativos. Ambos grupos, PV<sub>media</sub> ( $p < 0.05$ ) y PV<sub>mayor</sub> ( $p < 0.001$ ), mostraron aumentos significativos en la proteína TnT. La comparación entre-grupos reveló que el incremento en la proteína TnT fue significativamente mayor ( $p < 0.05$ ) para el grupo PV<sub>mayor</sub> que para PV<sub>menor</sub>.

**Tabla 52.** Cambios en las variables bioquímicas analizadas desde el pre-test al post-test para cada grupo de entrenamiento.

	PV <sub>menor</sub>			PV <sub>media</sub>			PV <sub>mayor</sub>		
	Pre	Post	Δ (%)	Pre	Post	Δ (%)	Pre	Post	Δ (%)
<b>Prolactina (ng·L<sup>-1</sup>)</b>	11.36 ± 4.00	10.89 ± 3.83	-3.4	16.66 ± 9.31	12.23 ± 6.73 **	-24.2	11.70 ± 2.58	10.83 ± 4.04	-10.5
<b>GH (ng·L<sup>-1</sup>)</b>	0.25 ± 0.34	0.23 ± 0.21	24.2	0.56 ± 1.41	0.65 ± 1.06	77.4	0.41 ± 0.62	0.30 ± 0.44 *	-38.9
<b>IGF-1 (ng·L<sup>-1</sup>)</b>	238.82 ± 35.80	270.64 ± 96.83	9.5	304.00 ± 57.95	313.36 ± 53.15	3.6	249.50 ± 59.78	245.33 ± 81.27	-3.7
<b>Cortisol (mmol·L<sup>-1</sup>)</b>	420.27 ± 179.23	371.25 ± 118.64	-7.5	472.21 ± 196.42	413.50 ± 112.50	-8.4	415.61 ± 114.80	391.92 ± 160.81	-11.6
<b>Testosterona (mmol·L<sup>-1</sup>)</b>	18.22 ± 6.19	18.78 ± 5.19	7.0	17.34 ± 5.29	18.16 ± 6.46	4.1	18.62 ± 3.45	18.91 ± 3.93	1.1
<b>Cociente T/C</b>	0.046 ± 0.027	0.050 ± 0.015	25.7	0.040 ± 0.014	0.046 ± 0.017	13.6	0.048 ± 0.014	0.058 ± 0.031	14.4
<b>Troponina-T (ng·L<sup>-1</sup>)</b>	3.02 ± 0.08	3.38 ± 0.70	10.3	3.00 ± 0.00	4.02 ± 1.32 *	28.4	3.00 ± 0.01	5.21 ± 2.33 ***†	59.4

Δ: Cambios pre-post entrenamiento; PV<sub>menor</sub>: Grupo que entrenó con una menor pérdida de velocidad en la serie (n = 11); PV<sub>media</sub>: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie (n = 11) media; PV<sub>mayor</sub>: Grupo que entrenó con una mayor pérdida de velocidad en la serie (n = 12). Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV<sub>menor</sub>: † p < 0.05. Diferencias estadísticamente significativas intra-grupo: \* p < 0.05; \*\* p < 0.01; \*\*\* p < 0.001.

## Eficiencia

La eficiencia del entrenamiento fue superior en el grupo  $PV_{menor}$  comparado con los otros dos grupos experimentales. El número de repeticiones necesario para obtener una unidad de mejora en todas las variables analizadas tanto en el entrenamiento de sentadilla completa como en el de press de banca (Tabla 53) fue inferior para el grupo  $PV_{menor}$  comparado con los grupos  $PV_{media}$  y  $PV_{mayor}$ . Del mismo modo, el entrenamiento llevado a cabo por el grupo  $PV_{media}$  fue más eficiente que el de  $PV_{mayor}$  excepto para las variables CMJ y  $1RM_{est}$  en el ejercicio de press de banca.

**Tabla 53.** Eficiencia del entrenamiento para cada grupo experimental.

Variable	SQ			PB		
	PV10%	PV30%	PV45%	PV15%	PV40%	PV55%
CMJ	15.2	118.2	93.7			
T10	58.4	172.0	9240.0			
T20	76.6	171.8	1085.1			
$1RM_{est}$	8.2	15.7	33.2	15.2	118.2	93.7
$VMP_{CC}$	11.4	23.8	66.8	11.4	23.8	66.8
$VMP_{CB}$	21.3	47.0	263.7	21.3	47.0	263.7
$VMP_{CA}$	6.4	13.5	27.1	6.4	13.5	27.1
Test de fatiga	3.1	5.3	9.6	12.4	19.7	21.6

La eficiencia indica el número de repeticiones que ha necesitado realizar cada grupo para obtener una unidad de mejora (1%) en las variables analizadas. SQ: Sentadilla completa; PB: Press de banca; PV10%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 10% ( $n = 11$ ) en el ejercicio de **sentadilla completa**; PV30%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 30% ( $n = 11$ ) en el ejercicio de **sentadilla completa**; PV45%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 45% ( $n = 12$ ) en el ejercicio de **sentadilla completa**; PV15%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 15% ( $n = 11$ ) en el ejercicio de **press de banca**; PV40%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 40% ( $n = 11$ ) en el ejercicio de **press de banca**; PV55%: Grupo que entrenó con una pérdida de velocidad en la serie del 55% ( $n = 12$ ) en el ejercicio de **press de banca**;  $1RM_{est}$ : Una repetición máxima estimada; CMJ: Altura de salto con contramovimiento; T10: Tiempo en recorrer 10 m; T20: Tiempo en recorrer 20 m;  $VMP_{CC}$ : Promedio de la velocidad media propulsiva con todas las cargas comunes durante el Pre- y el Post-test;  $VMP_{CB}$ : Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas iguales o inferiores al ~60% 1RM en el pre test;  $VMP_{CA}$ : Promedio de la velocidad media propulsiva obtenida con aquellas cargas absolutas superiores al ~60% 1RM en el pre-test.



### 6.5.3. Discusión

El objetivo del presente estudio fue analizar el efecto de tres magnitudes de pérdida de velocidad dentro de la serie (10, 30 y 45% en el ejercicio de sentadilla completa y 15, 40 y 55% en el ejercicio de press de banca) ante las mismas intensidades relativas (55 - 70% 1RM) sobre los cambios en el rendimiento neuromuscular y el efecto crónico hormonal. Nuestros resultados mostraron que, después de realizar un entrenamiento de fuerza en el ejercicio de sentadilla completa, el grupo que alcanzó una menor pérdida de velocidad en la serie (PV10%) obtuvo mayores ganancias en el salto vertical y la capacidad de aceleración, y similares e incluso mayores incrementos de fuerza y resistencia muscular, según las variables analizadas, que los grupos PV30% y PV45%. Esas mejoras fueron acompañadas por un mayor aumento de la actividad eléctrica muscular. En el ejercicio de press de banca, el grupo que alcanzó una pérdida de velocidad en la serie del 40% mostró mayores incrementos en la fuerza, la resistencia muscular y la VMP ante distintas cargas absolutas en comparación con los otros dos grupos experimentales (PV15% y PV55%). Además, entrenar con una mayor pérdida de velocidad en la serie produjo un mayor daño muscular. Por tanto, nuestros resultados parecen indicar que el grado de fatiga inducido en cada serie de entrenamiento (cuantificado a través de la pérdida de velocidad en la serie) es un factor determinante para modular las adaptaciones neuromusculares que se producen durante el entrenamiento de fuerza.

Al igual que en el **Estudio III.1** de la presente Tesis, la medición, el control y el análisis de la velocidad de ejecución de cada repetición durante todo el ciclo de entrenamiento nos permitió ajustar la intensidad relativa (González-Badillo & Sánchez-Medina, 2010; Sánchez-Medina, et al., 2017) y la pérdida de velocidad en la serie (González-Badillo, et al., 2011; Pareja-Blanco et al., 2016b; Sánchez-Medina & González-Badillo, 2011) para cada participante en cada sesión. Así, los resultados de nuestro estudio indican que la mejor VMP de la primera serie de entrenamiento (la cual determina la intensidad relativa) fue similar para los tres grupos de entrenamiento en todas las sesiones, tanto en el ejercicio de sentadilla completa (**Tabla 46**) como en el de press de banca (**Tabla 47**). Por tanto, es razonable admitir que las diferencias existentes entre los tres grupos experimentales en las distintas variables analizadas fueron debidas a las diferencias en el volumen de entrenamiento, determinado éste a través de la pérdida de velocidad en la serie, el cual también se ajustó a lo programado (**Tabla 46 y 47**).

### **Cambios en la fuerza, la resistencia muscular, el CMJ y el sprint después del entrenamiento de sentadilla completa**

Después del periodo de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla completa, los grupos PV10% y PV30% mostraron aumentos significativos en las variables  $1RM_{est}$ ,  $VMP_{CC}$ ,  $VMP_{CB}$ ,  $VMP_{CA}$ , el test de fatiga y la VMP ante distintas cargas absolutas (**Tabla 48 y Figura 52A y 52B**), mientras que el grupo PV45% no manifestó cambios significativos en las variables  $VMP_{CB}$ ,  $VSQ_{30,40,50,80}$ . Los porcentajes de cambio en los grupos PV10% y PV30% fueron superiores a los del grupo PV45% en todas las variables analizadas. Además, aunque no hubo diferencias significativas entre PV10% y PV30%, el grupo PV10% mostró un mayor TE intra- y entre-grupos que el grupo PV30% en todas las variables medidas durante el test incremental de sentadilla completa. Consideramos relevante destacar que, al igual que en el **Estudio III.1**, el grupo PV10% obtuvo mayores incrementos en la fuerza y la resistencia muscular que los grupos PV30% y PV45% a pesar de haber realizado, como media, aproximadamente la mitad (51.9%) de las repeticiones realizadas por el grupo PV30% ( $108.7 \pm 29.0$  vs.  $347.9 \pm 62.3$  repeticiones para PV10% y PV30%, respectivamente), y un tercio (36.1%) de las repeticiones realizadas por el grupo PV45% ( $501.1 \pm 106.8$  repeticiones). Esto fue especialmente relevante para la mejora del test de fatiga muscular, ya que, en contra de lo que indican algunas revisiones (Bird, et al., 2005; Ratamess et al., 2009; Schott, McCully, & Rutherford, 1995), parece que el incremento en el número de repeticiones realizable ante un peso determinado no depende de la realización de un mayor volumen durante el entrenamiento de fuerza. Como indicamos en el **Estudio III.1** en relación con el press de banca, estos incrementos fueron debidos, principalmente, al aumento de la  $1RM$ , ya que se encontró una relación significativa entre los cambios en la  $1RM_{est}$  y los cambios en el número de repeticiones realizado ante la misma carga absoluta ( $r = 0.75$ ;  $p < 0.001$ ).

De acuerdo con estudios previos (Folland, Irish, Roberts, Tarr, & Jones, 2002; González-Badillo, et al., 2005; González-Badillo, et al., 2006; Izquierdo-Gabarren et al., 2010; Izquierdo et al., 2006; Pareja-Blanco, et al., 2016b; Sampson & Groeller, 2016), nuestros resultados refuerzan la hipótesis de que no realizar repeticiones hasta el fallo muscular puede proporcionar mayores ganancias de fuerza que llegando a dicho fallo. De hecho, los resultados del presente estudio son totalmente opuestos a aquellos que indican que es necesario realizar el máximo número de repeticiones por serie para maximizar las ganancias de fuerza (Bird, et al., 2005; Kraemer et al., 2002; Kraemer &



Ratamess, 2004; Ratamess et al., 2009), ya que el grupo que entrenó con un menor grado de fatiga en cada serie (PV10%) mostró los mayores incrementos de fuerza y resistencia muscular que los otros dos grupos experimentales, y estas ganancias fueron menores a medida que aumentó el porcentaje de pérdida de velocidad en la serie.

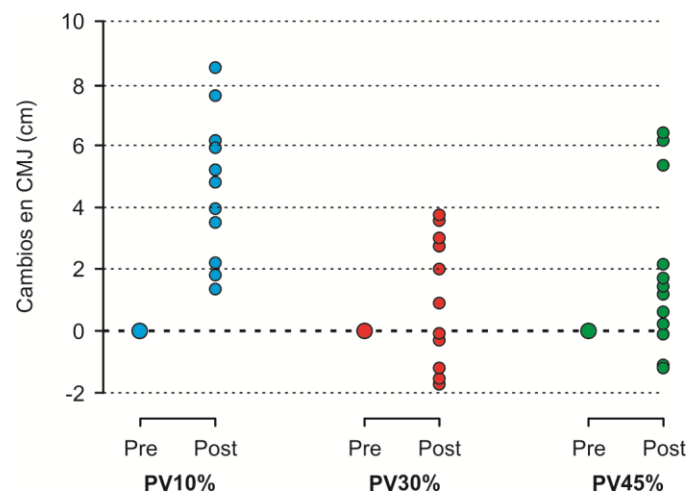
Los incrementos en la fuerza y la VMP ante las distintas cargas absolutas analizadas antes y después del entrenamiento en los grupos PV10% y PV30% fueron acompañadas de un incremento, aunque no significativo, de la activación muscular (RMS). Estos resultados son similares a los mostrados en el **Estudio III.1**. Por tanto, las explicaciones expuestas en el **Discusión** de dicho estudio (Apartado 6.4.3) sobre la probable influencia del incremento de la RMS en la mejora de la fuerza y los factores fisiológicos relacionados con el cambio en la actividad eléctrica muscular podrían ser las mismas para el presente estudio. Aunque el grupo PV45% también mostró incrementos en la VMP ante cada carga (30 - 80 kg; **Figura 52C y 54A**), el análisis de la EMG del cuádriceps resultó en un descenso de los valores de RMS tras el programa de entrenamiento. En concordancia con estos resultados, en otros estudios (Ferri et al., 2003; Keen, Yue, & Enoka, 1994; Tillin & Folland, 2014) tampoco se han encontrado cambios en la amplitud de la EMG a pesar de haber mostrados incrementos en la 1RM o la fuerza isométrica máxima. Por tanto, estos resultados parecen indicar que: (1) o la EMG de superficie no fue capaz de detectar los cambios que se han podido producir a nivel neural en la musculatura agonista del movimiento; (2) o que los cambios en la VMP ante las distintas cargas en el grupo PV45% fueron debidos en mayor medida a otros factores estructurales relacionados con la producción de fuerza muscular (sección transversal del músculo y de las fibras musculares, transformación del tipo y proporción de fibras, etc.).

El grupo PV10% también mostró mayores incrementos que PV30% y PV45% en las variables CMJ, T10 y T20. Por otra parte, el grupo PV30% alcanzó mayores ganancias que PV45% en el sprint, mientras que en el CMJ el grupo PV45% mostró un mayor aumento que el grupo PV30%. Dada la enorme plasticidad y especificidad de las adaptaciones neuromusculares que se producen con el entrenamiento de fuerza (Coffey & Hawley, 2007; Hoppeler, 2016; Spiering et al., 2008), es probable que las mayores ganancias obtenidas por el grupo PV10%, en comparación con los otros dos grupos, tanto en el CMJ y el sprint como en la VMP ante cargas bajas, puedan deberse a la mayor velocidad media de entrenamiento (PV10%:  $0.91 \pm 0.02$ ; PV30%:  $0.83 \pm 0.01$ ;

PV45%:  $0.76 \pm 0.01$ ; **Figura 50**), ya que el número de repeticiones realizado a altas velocidades ( $>0.90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) fue similar para los tres grupos experimentales (**Figura 51A**). En relación con esta argumentación, en diversos estudio (González-Badillo, et al., 2014; Mora-Custodio, et al., 2016; Pareja-Blanco, et al., 2014; Pareja-Blanco, et al., 2016b; Pareja-Blanco, et al., 2016c) se ha puesto de manifiesto la importancia de la velocidad absoluta de entrenamiento para la mejora de la fuerza y sobre todo del salto vertical y la capacidad de aceleración. Además, en el **Estudio III.1** de la presente Tesis también se encontró que el grupo que entrenó con una menor pérdida de velocidad en la serie, es decir, mayor velocidad media de entrenamiento, también mostró un mayor incremento en el CMJ, el sprint y la VMP ante cargas bajas que los grupos que entrenaron con una mayor pérdida de velocidad en la serie (**Figura 48**).

En línea con esta idea de la velocidad absoluta de entrenamiento como elemento clave para las adaptaciones neuromusculares, y dada la relación que existe entre los cambios en la fuerza de las piernas y el sprint con los cambios en el CMJ (Franco-Marquez et al., 2015; Rodríguez-Rosell et al., 2016; Wisloff, et al., 2004), resultó sorprendente encontrar que el grupo PV45% mostró mayores incremento en el CMJ que PV30%. No está claro el porqué de estos resultados pero una posible explicación podría estar en la respuesta individual de cada participante. La respuesta después de un entrenamiento de fuerza se describe habitualmente en términos generales, con la suposición de que la media del grupo representa la respuesta de la mayoría de los individuos. Sin embargo, esto no siempre se corresponde con la realidad. En nuestro caso, si analizamos específicamente los cambios en cada uno de los participantes del grupo PV45% se puede observar cómo el incremento en el rendimiento en el CMJ se debió principalmente a la enorme mejora de 3 individuos que experimentaron un aumento superior a 5 cm de salto después del entrenamiento, mientras que el resto mejoró menos de 2 cm e incluso algunos empeoraron su rendimiento (**Figura 59**). A estos individuos que alcanzan cambios excepcionalmente grandes después de un periodo de entrenamiento, ya sea de fuerza o resistencia, se les denomina *respondedores* (Mann, Lamberts, & Lambert, 2014). Los factores que determinan la capacidad de respuesta de un individuo ante un entrenamiento de fuerza determinado aún no han sido esclarecidos totalmente, aunque en algunos estudios se ha indicado que esto podría estar relacionado con el genotipo y el fenotipo de cada individuo (Mann, et al., 2014), y más concretamente con la regulación de la expresión de MicroRNA en el músculo

esquelético (Davidsen et al., 2011; Ogasawara et al., 2016) y otros factores como la secreción de interleukina-1 $\beta$ , irisina o factor neurotrófico derivado del cerebro (Prestes et al., 2015). Por tanto, es probable que estos individuos del grupo PV45% que manifestaron una respuesta excepcionalmente grande en el CMJ en comparación con los otros individuos del mismo grupo, hubieran obtenido una respuesta similar, o incluso superior, si hubieran realizado un entrenamiento con un grado de esfuerzo menor porque probablemente tenían una predisposición genética especialmente alta para este tipo de rendimiento.

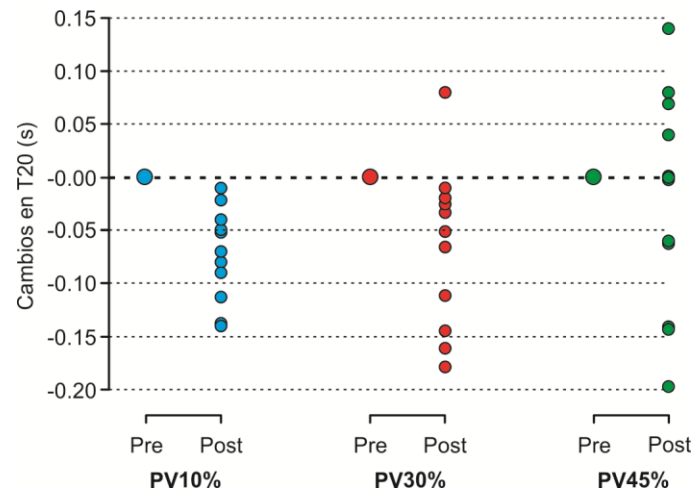


**Figura 59.** Respuesta individual de cada uno de los participantes de los tres grupos experimentales en la variable **CMJ**: PV10% (**Azul**); PV30% (**Rojo**); PV45% (**Verde**).

Otro aspecto importante a destacar de la respuesta individual en el CMJ es que todos los participantes del grupo PV10% mejoraron su rendimiento, mientras que en los otros grupos hubo individuos que no mostraron cambios y que incluso empeoraron la altura de salto después de las 8 semanas de entrenamiento. Esto parece indicar que este tipo de entrenamiento, caracterizado por una alta velocidad absoluta de ejecución y un bajo grado de esfuerzo, resulta más favorable para la mejora del CMJ que alcanzar durante el entrenamiento un grado de fatiga mayor.

En el caso de las variables T10 y T20, los datos del presente estudio concuerdan con los mostrados en el **Estudio III.1** de la presente Tesis y con otros estudios (Chelly et al., 2009; Kotzamanidis, Chatzopoulos, Michailidis, Papaïakovou, & Patikas, 2005; Ronnestad, Kvamme, Sunde, & Raastad, 2008), en los cuales se ha encontrado que hacer entrenamientos de fuerza completando el máximo o casi máximo número de repeticiones por serie no produce mejoras sobre la capacidad de aceleración. A pesar de ello, la respuesta individual en esta variable también merece especial atención. Aunque se ha descrito que aquellos individuos que muestran una *alta respuesta* en una variable concreta no necesariamente muestran una *alta respuesta* en otra variable (Mann, et al., 2014), en la **Figura 60** se puede observar cómo, en el grupo PV45%, hay especialmente 3 individuos que mostraron un descenso importante en el tiempo en recorrer 20 m. Esos 3 individuos fueron los mismos que experimentaron un mayor aumento en el CMJ. Aunque estos resultados podría ser esperados dada la relación que existe entre el CMJ y la capacidad de aceleración (Franco-Marquez, et al., 2015; Rodríguez-Rosell, et al., 2016; Wisloff, et al., 2004), llama la atención la alta respuesta alcanzada por estos 3 sujetos en comparación con el resto del grupo, lo que refuerza la idea expuesta anteriormente de que es probable que éstos tuvieran una mayor predisposición genética que el resto de los participantes en el estudio para obtener mejoras después de un entrenamiento de fuerza, independientemente del volumen y la intensidad realizados.

Por otro lado, como ocurrió en el CMJ, todos los participantes del grupo PV10% mostraron una mejora del rendimiento en T20. Estos resultados ponen de manifiesto la utilidad que podría tener este tipo de entrenamiento para deportes en los que el salto vertical y la capacidad de aceleración en distancias cortas son factores determinantes, puesto que permiten mejorar estas habilidades con un bajo grado de fatiga (ver **Estudio II**), lo cual evita una posible interferencia con el entrenamiento de otras capacidades o habilidades técnico-tácticas.



**Figura 60.** Respuesta individual de cada uno de los participantes de los tres grupos experimentales en la variable **T20**: PV10% (**Azul**); PV30% (**Rojo**); PV45% (**Verde**).

### **Relación pérdida de velocidad-cambios en el rendimiento en las variables relacionadas con el entrenamiento de sentadilla completa**

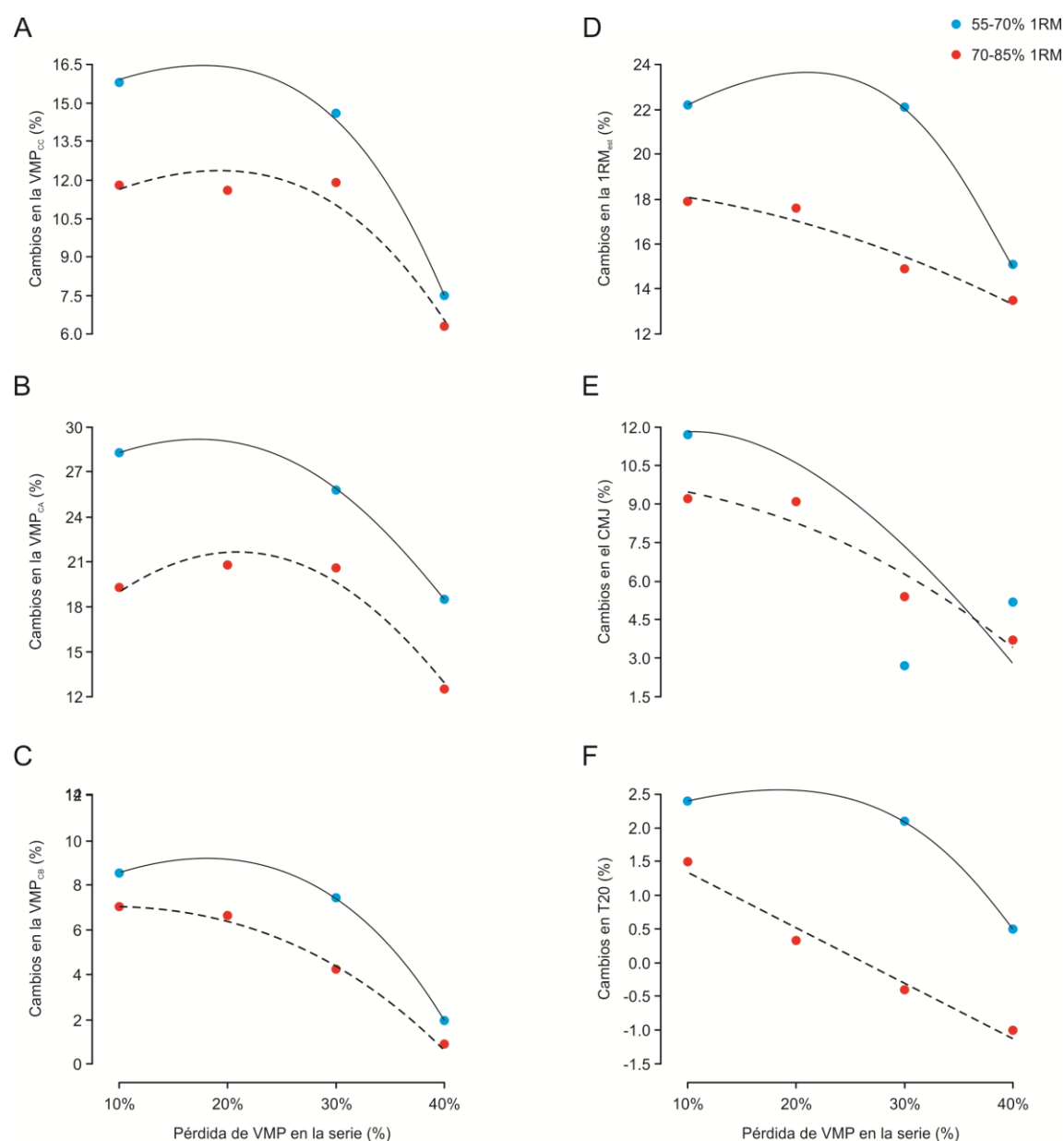
Al igual que en el **Estudio III.1**, el porcentaje de cambio de las variables analizadas durante el test incremental en sentadilla completa mostró una relación curvilínea con el porcentaje de pérdida alcanzado dentro de la serie (**Figura 61**). Los mayores porcentajes de cambio en las variables relacionadas con la fuerza muscular se encontraron en el grupo PV10%, mientras que el grupo PV45% mostró los menores incrementos. Estos resultados están en concordancia con los mostrados en el **Estudio III.1** y muestran nuevamente que entrenar sentadilla completa con el máximo grado de esfuerzo ante un rango de intensidades relativas determinado (55 - 85% 1RM) no solo no produce las mayores ganancias de fuerza, sino que es probable que se obtengan los peores resultados. Además, como se puede observar en las **Figuras 61A, 61B, 61C y 61D**, los porcentajes de cambio para las variables  $VMP_{CC}$ ,  $VMP_{CA}$ ,  $VMP_{CB}$  y  $1RM_{est}$ , respectivamente, tienden a ser superiores para el entrenamiento realizado con intensidades relativas que oscilaron entre el 55 - 70% 1RM en comparación con el 70 - 85% 1RM utilizado en el **Estudio III.1**, y hubo una ligera tendencia a que las diferencias ante el mismo porcentaje de pérdida de velocidad en la serie entre las distintas intensidades relativas fueran mayores cuanto menor fue el porcentaje de pérdida de velocidad permitido en la serie. Estos resultados parecen estar en contra de la mayoría de revisiones (Behringer, Vom Heede, Yue, & Mester, 2010; Bird, et al., 2005; Fry,

2004; Kraemer & Ratamess, 2004) y *positions stand* (Kraemer, et al., 2002; Ratamess, et al., 2009) sobre entrenamiento de fuerza, los cuales indican que para obtener las mayores ganancias de fuerza máxima (1RM) es necesario entrenar con intensidades relativas superiores al 70 - 75% 1RM y completando el máximo número de repeticiones por serie. Además, aquellos estudios en los que se comparó el efecto de entrenar con distintas intensidades relativas (altas vs. bajas) se concluyó que el entrenamiento con una alta intensidad relativa es más favorable para la mejora de la fuerza (Berger, 1962, 1965; Campos et al., 2002; Chestnut & Docherty, 1999; Holm et al., 2008; Rhea, Alvar, Burkett, & Ball, 2003). Sin embargo, parece que estos autores no tienen evidencias para soportar estas afirmaciones (Carpinelli, 2008; Carpinelli, Otto, & Winett, 2004), ya que la mayoría de los estudios no mostraron diferencias significativas entre los distintos grupos experimentales (Carpinelli, 2008; Carpinelli, et al., 2004). En relación con nuestros resultados, en un estudio realizado por nuestro grupo de investigación y publicado recientemente (Mora-Custodio, et al., 2016) se comparó el efecto de dos programas de entrenamiento, usando el ejercicio de sentadilla completa, que diferían únicamente en la intensidad relativa utilizada (40 - 60% 1RM vs. 65 - 80% 1RM) y se encontró que, aunque no se encontraron diferencias significativas entre ambos grupos, el porcentaje de cambio para la  $1RM_{est}$  y la VMP ante distintas cargas absolutas fue superior para el grupo que entrenó con una menor intensidad relativa (40 - 60% 1RM) en comparación con el otro grupo experimental que entrenó con una mayor intensidad relativa (65 - 80% 1RM). Por tanto, nuestros resultados sugieren que realizar un entrenamiento de sentadilla completa con intensidades relativas moderadas-bajas (55-70% 1RM) y un bajo porcentaje de pérdida de velocidad en la serie (10%) no solo es más favorable para la mejora de acciones de alta velocidad, sino también para la mejora de la fuerza muscular, cuantificada a través de la estimación de la RM y la VMP ante distintas cargas absolutas.

A diferencia de los resultados mostrados en el **Estudio III.1** de la presente Tesis, los cambios en T20 de este estudio mostraron una tendencia curvilínea con la pérdida de velocidad permitida en la serie durante el entrenamiento de fuerza, y fueron mayores que los encontrados con intensidades relativas del 70 - 85% 1RM (**Figura 61F**). Lo mismo ocurrió en el CMJ a excepción de los resultados obtenidos por el grupo PV30% del presente estudio, el cual mostró menores porcentajes de cambio que el grupo PV45%. En base a los resultados del **Estudio III.1**, los de Pareja-Blanco, et al. (2016b) y

los del presente estudio, se observa que la menor pérdida de velocidad en la serie, al igual que en el resto de variables de rendimiento, tiende a ofrecer los mejores resultados con cualquier intensidad, y que la mayor pérdida ofrece mejor resultado si las intensidades son menores. Sólo se da un resultado que no sigue esta tendencia, como se ha comentado previamente, con el grupo PV30% e intensidades del 55 al 70%, el cual no tiene una explicación plausible por nuestra parte.

Los mayores porcentajes de cambio ante la misma pérdida de velocidad en la serie mostrados en CMJ (excepto en el grupo PV30%) y T20 en el presente estudio (55 - 70% 1RM) en comparación con los obtenidos con intensidades relativas del 70 - 85% 1RM podrían estar en relación con el principio de especificidad del entrenamiento. Aunque la pérdida de velocidad en la serie fue la misma y el grado de fatiga fuera ligeramente mayor en los grupos que entrenaron con intensidades relativa del 55 - 70% 1RM (ver **Estudio II**), la velocidad media de entrenamiento fue mayor para los grupos que entrenaron con menor intensidad relativa (PV10%:  $0.91 \pm 0.02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  vs.  $0.70 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; PV30%:  $0.83 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  vs.  $0.63 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ; PV45%:  $0.76 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  vs.  $0.57 \pm 0.01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) puesto que éstas se desplazan a mayor velocidad absoluta. Además, los grupos que entrenaron con el 55-70% 1RM realizaron un mayor número de repeticiones a velocidades superiores a  $0.80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  que aquellos que entrenaron con intensidades relativas del 70 - 85% 1RM. Estos factores, junto con el menor número de repeticiones realizado a bajas velocidades ( $< 0.80 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) pudo favorecer las adaptaciones y la transferencia hacia acciones deportivas de alta velocidad como el salto y el sprint. Por tanto, no solo sería importante y conveniente determinar un límite de pérdida de velocidad en la serie durante el entrenamiento de fuerza como una estrategia para evitar realizar repeticiones innecesarias, lentas y fatigantes que podrían ser contraproducentes para obtener adaptaciones relacionadas con la rápida producción de fuerza requerida en muchos deportes y disciplinas deportivas, sino que también sería interesante determinar las intensidades relativas que permiten mejores adaptaciones para esas acciones de alta velocidad como el salto y el sprint, ya que, como se puede observar en la **Figura 61**, la magnitud de la carga (% 1RM) con el que se entrena también influyen en el porcentaje de cambio de estas variables.



**Figura 61.** Relación entre la pérdida de velocidad en la serie y el porcentaje de cambio obtenido en las diferentes variables analizadas en el ejercicio de **sentadilla completa** después de dos programas de entrenamiento con distinto rango de intensidades: 55 - 70% 1RM (**Azul**) y 70 - 85% 1RM (**Rojo**). Para estas representaciones gráficas se han utilizado los resultados del **Estudio III.1**, **Estudio III.2** y los resultados mostrados por Pareja-Blanco et al. (2016b).

### **Cambios en la fuerza y la resistencia muscular después del entrenamiento de press de banca**

Los tres grupos experimentales mostraron incrementos significativos en todas las variables mecánicas medidas durante el test de press de banca (**Tabla 50**). Sin embargo,



el grupo PV40% obtuvo los mayores porcentajes de cambio en comparación con los otros dos grupos, excepto en la variable test de fatiga, donde el grupo PV55% alcanzó mayores ganancias que PV15% y PV40%. Sería razonable decir aquí, por tanto, que, como indica la mayoría de los estudios (Bird, et al., 2005; Kraemer & Ratamess, 2004; Ratamess, et al., 2009), realizar un mayor número de repeticiones durante el entrenamiento es favorable para mejorar la resistencia muscular en el propio ejercicio de entrenamiento. Sin embargo, la relación encontrada entre los cambios individuales en la  $1RM_{est}$  y los cambios individuales en el test de fatiga ( $r = 0.60$ ;  $p < 0.01$ ) parece indicar nuevamente que los cambios en el número de repeticiones que se pueden realizar ante una carga absoluta determinada depende fundamentalmente del incremento de la fuerza máxima (1RM) experimentado por el sujeto durante el periodo de entrenamiento. Por tanto, incluso cuando el objetivo del entrenamiento de fuerza esté orientado hacia la mejora de la resistencia muscular (i.e., hacer contracciones musculares intensas durante un tiempo prolongado o hacer más contracciones o más intensidad durante el tiempo que dura la prueba), no sería necesario ni recomendable realizar series hasta el fallo muscular. El objetivo para ese tipo de pruebas debe ser también intentar que la carga a desplazar represente cada vez un porcentaje de la 1RM menor para poder realizar un mayor número de repeticiones o hacer las mismas repeticiones a más velocidad. Por tanto, hay que utilizar aquellos programas de entrenamiento que induzcan mayores incrementos sobre la 1RM. Según nuestros resultados, estos serían aquellos en los que se alcanzan una pérdida de velocidad en la serie próxima al 40%. De este modo, los resultados del presente estudio coinciden con los mostrados en el **Estudio III.1**, a pesar de que el rango de intensidades relativas utilizado fue diferentes (55 - 70% vs. 70 - 85% de 1RM, para el **Estudio III.2** y el **Estudio III.1**, respectivamente) y sugieren que, en comparación con el entrenamiento de sentadilla completa (10 - 15% de pérdida de velocidad en la serie), para el press de banca sería necesario alcanzar un porcentaje de pérdida de velocidad en la serie superior (40%), que permita realizar un porcentaje de repeticiones próximo al 65 - 70% de las repeticiones posibles con intensidades relativas que oscilen entre 50 - 80% 1RM (ver **Estudio I.1**). Por tanto, nuestros resultados confirman de nuevo que no sería adecuado usar entrenamientos completando el máximo o casi máximo número de repeticiones por serie, lo cuales están asociados con un mayor grado de fatiga, mayor tiempo de recuperación (González-Badillo et al., 2016; Gorostiaga et al., 2012; Gorostiaga et al., 2014; Pareja-Blanco, 2016; Pareja-Blanco et

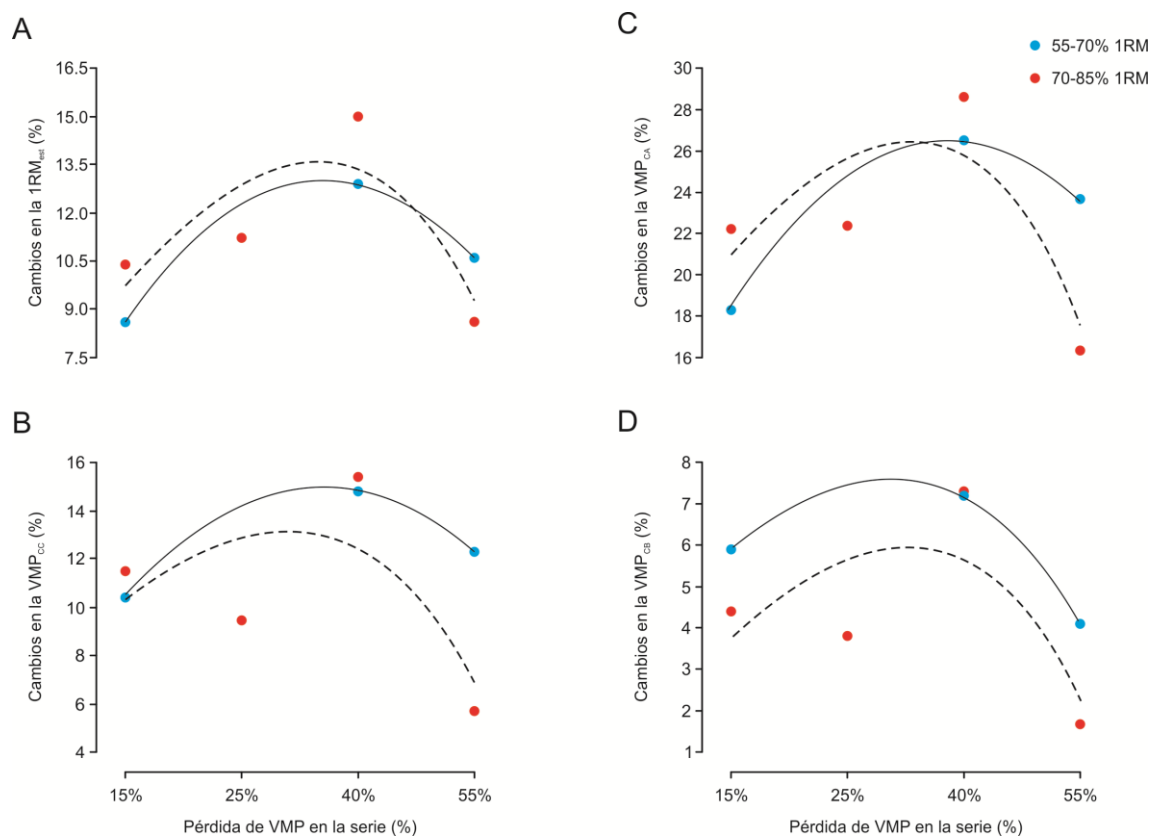
al., 2016a; Sánchez-Medina, García-Pallarés, Pérez, Fernandes, & González Badillo, 2011) y menores mejoras de la VMP ante cargas bajas (ver **Tablas 50 y 51; Figura 53**).

### **Relación pérdida de velocidad-cambios en el rendimiento en las variables relacionadas con el entrenamiento de press de banca**

En la **Figura 62** aparece la comparación del porcentaje de cambio de cada una de las variables analizadas en el press de banca para las intensidades relativas del 55 - 70% 1RM y 70 - 85% 1RM y las pérdidas de velocidad del 15, 25, 40 y 55%. En ella se puede observar cómo los grupos PV15% y PV40% mostraron mayores incrementos en las variables  $1RM_{est}$ ,  $VMP_{CC}$  y  $VMP_{CA}$  cuando el entrenamiento se realizó con una mayor intensidad relativa (70 - 85% de 1RM). Estos resultados son distintos a los mostrados anteriormente en relación con el entrenamiento de sentadilla completa, y parecen indicar que, para el ejercicio de press de banca, cuando se entrena con una pérdida de velocidad en la serie inferior al 40%, utilizar intensidades relativas del 70-85% 1RM resulta en mayores incrementos de la fuerza muscular que entrenar con el 55-70% 1RM. Es pertinente indicar aquí que esto implica entrenar con un menor grado de esfuerzo en cada serie de entrenamiento, ya que para una misma pérdida de velocidad en la serie, menores velocidades iniciales (i.e., mayores intensidades relativas) resultan en menores niveles de fatiga neuromuscular y estrés metabólico (ver **Estudio II**). Sin embargo, para pérdidas de velocidad en la serie del 55%, es más favorable entrenar con intensidades relativas del 55 - 70% 1RM que con el 70 - 85% 1RM, a pesar de que este tipo de entrenamiento está asociado con un mayor grado de fatiga. No conocemos las razones precisas por las que se da esta respuesta diferenciada entre los distintos rangos de intensidades relativas en función del porcentaje de pérdida de velocidad alcanzada en la serie, pero es probable que tenga relación con las propias características del entrenamiento. Mientras que hacer series con el 55% de pérdida de velocidad en la serie con cargas que oscilan entre 70 - 85% 1RM supone llegar al fallo muscular en muchas de las sesiones, esa misma pérdida de velocidad ante intensidades inferiores supone realizar aproximadamente el 80% de las repeticiones realizables. Esto está relacionado con la realización de un mayor número de repeticiones a bajas velocidades y una menor velocidad media de entrenamiento del grupo que entrenó con mayores intensidades relativas. Por tanto, este tipo de entrenamiento podría haber derivado en mayor medida

en transformaciones de fibras hacia isoformas más lentas (Andersen et al., 2005; Andersen, et al., 2010; Pareja-Blanco, et al., 2016b) y en una disminución de la capacidad de aplicar fuerza ante las mismas cargas absolutas.

Por último, es importante destacar que, a diferencia de las otras variables analizadas, el grupo PV10% mostró mayores incrementos en la VMP ante cargas bajas (inferiores al 60% 1RM) con intensidades del 55 - 70% 1RM que con el 70 - 85% 1RM (**Figura 62D**). Esto podría estar relacionado con el principio de especificidad, ya que ese grupo entrenó con intensidades relativas y a velocidades más próximas a las cargas propias del test. Por tanto, una de las conclusiones importantes de este estudio es que se debería de ajustar la intensidad relativa utilizada y el porcentaje de pérdida de velocidad permitido en cada serie de entrenamiento en función de la variable que queramos mejorar.



**Figura 62.** Relación entre la pérdida de velocidad en la serie y el porcentaje de cambio obtenido en las diferentes variables analizadas en el ejercicio de **press de banca** después de dos programas de entrenamiento con distinto rango de intensidades: 55 - 70% 1RM (**Azul**) y 70 - 85% 1RM (**Rojo**). Para estas relaciones se han utilizado los resultados del **Estudio III.1**, **Estudio III.2** y los resultados mostrados por Pareja-Blanco et al. (2016b).

**Evolución de la  $1RM_{est}$  y el CMJ durante el ciclo de entrenamiento**

Además de conocer los cambios pre-post producido por diferentes protocolos de entrenamiento de fuerza, saber cuál ha sido la evolución de distintas variables de rendimiento durante el ciclo de entrenamiento podría suponer una información de gran importancia que puede ser utilizada para modificar y ajustar las cargas (volumen e intensidad relativa) de entrenamiento durante el propio ciclo de entrenamiento con el fin de modificar el estímulo proporcionado durante cada sesión. El control de la velocidad y el ajuste diario de la carga de entrenamiento a la velocidad objetivo permitió estimar la  $1RM$  de cada participante en cada sesión de entrenamiento y establecer la evolución de esta variable a lo largo del ciclo de entrenamiento (**Figuras 57 y 58**).

En el ejercicio de sentadilla completa (**Figura 57**), el grupo PV10% mostró un incremento progresivo de la  $1RM_{est}$  hasta la semana 6 (S6), a partir de la cual los valores de  $1RM_{est}$  se mantuvieron prácticamente constantes hasta el final del ciclo. En el grupo PV30%, después de un ligero incremento del rendimiento en la primera semana de entrenamiento, se produjo un descenso en la  $1RM_{est}$  durante las dos semanas siguientes (S2 y S3). Esta pérdida de rendimiento coincidió con el aumento del *índice de esfuerzo* medio en estas dos semanas. Posteriormente, el *índice de esfuerzo* medio de cada semana disminuyó mientras que la  $1RM_{est}$  aumentó progresivamente hasta el post-test. Este comportamiento fue similar al mostrado por el grupo PV30% en el **Estudio III.1**. En el grupo PV45% también ocurrió algo parecido, con un ligero aumento de la  $1RM_{est}$  en la primera semana seguido por tres semanas en las que la  $1RM_{est}$  prácticamente no se modificó coincidiendo con los mayores *índices de esfuerzo* de todo el ciclo de entrenamiento. Aunque es difícil establecer una relación causa-efecto entre el cambio en la  $1RM$  y el *índice de esfuerzo*, la coincidencia en el tiempo de los cambios en ambas variables en ambos estudios (**Estudio III.1** y **Estudio III.2**) sugiere que dicho *índice* puede ser un factor importante para determinar la fatiga aguda (ver **Estudio II**) y, consecuentemente, las adaptaciones que se puedan producir con el entrenamiento de fuerza. Por tanto, estos resultados sugieren que se podría considerar el *índice de esfuerzo* para programar el entrenamiento de fuerza.

Aunque el patrón de comportamiento de la  $1RM_{est}$  en sentadilla completa fue relativamente similar para los tres grupos experimentales, la evolución del CMJ mostró una clara diferencia entre el grupo PV10%, el cual aumentó el rendimiento

progresivamente, y los grupos PV30% y PV45%, los cuales experimentaron un descenso del rendimiento en las primeras semanas, y solo a partir de la semana 4 (S4) aumentaron los valores de CMJ. Estos resultados indican de nuevo que las adaptaciones son específicas del entrenamiento realizado y que el efecto de los diferentes programas de entrenamiento depende de la variable evaluada. Así, aunque la fuerza de las piernas tenga una importante relación con el rendimiento en el CMJ (Franco-Marquez, et al., 2015; Rodríguez-Rosell, et al., 2016; Wisloff, et al., 2004), no todos los programas de entrenamiento que producen mejoras sobre la fuerza máxima (1RM) tienen efecto sobre la capacidad de salto. Por tanto, estos resultados tendrían una gran aplicación práctica en deportes en los cuales se necesita alcanzar y mantener altos niveles de rendimiento en acciones de alta velocidad como el salto y el sprint durante largos periodos de tiempo mientras mantienen también el peso corporal. Así, en ese tipo de deportes podría ser suficiente realizar entrenamientos con intensidades relativas moderadas-bajas (45 - 65% 1RM) y pérdidas de velocidad en la serie del 10 - 15% que generen un bajo grado de fatiga que no interfiera con el desarrollo de otros componentes del entrenamiento y que, además, no produzca un excesivo grado de hipertrofia que pueda provocar un aumento de peso corporal innecesario.

En el ejercicio de press de banca, los tres grupos de entrenamiento mostraron un comportamiento similar, aunque el grupo PV55% experimentó un ligero descenso de la  $1RM_{est}$  en las primeras semanas de entrenamiento, que coincidió con los mayores *índices de esfuerzo* del ciclo, y solo a partir de la semana 3-4 comenzó a aumentar progresivamente la  $1RM_{est}$  en este grupo. De hecho, hasta la semana 4 (S4) los valores medios de  $1RM_{est}$  en el grupo PV15% fueron superiores a los de los otros dos grupos experimentales, a partir de la cual el rendimiento para PV40% y PV55% fue ligeramente superior en términos absolutos hasta el post-test. Por tanto, el análisis de la evolución de la  $1RM_{est}$  en el press de banca permite deducir que la utilización de bajos *índices de esfuerzo* ( $\sim 10$ ) es favorable para la mejora del rendimiento en las primeras semanas de entrenamiento, pero posteriormente sería conveniente aumentar el grado o magnitud de pérdida de velocidad en la serie para mantener o aumentar el *índice de esfuerzo* a medida que incrementa la intensidad relativa con el objetivo de poder seguir incrementando el rendimiento. Los mismos resultados se mostraron en el **Estudio III.1**.

### **Cambios bioquímicos**

Después del periodo de entrenamiento, los grupos  $PV_{media}$  y  $PV_{mayor}$  mostraron un aumento significativos en la proteína TnT y este fue mayor al experimentado por el grupo  $PV_{menor}$ . Estos resultados coinciden con los encontrados en el **Estudio III.1** de la presente Tesis, aunque en este caso, el grupo  $PV_{menor}$  no mostró un incremento significativo en la TnT. Como ya mencionamos en apartados anteriores, esta proteína está relacionada, entre otros factores, con el daño muscular producido durante el ejercicio físico (Carranza-Garcia et al., 2011; Legaz-Arrese et al., 2015; Serrano-Ostariz et al., 2011). Así, dado que una mayor pérdida de velocidad en la serie ante la misma intensidad relativa está asociada con la realización de un mayor número de repeticiones, y que esto genera un mayor estrés mecánico, metabólico, hormonal y cardiovascular (Buitrago, Wirtz, Flenker, & Kleinoder, 2014; Buitrago, Wirtz, Yue, Kleinoder, & Mester, 2012), era de esperar que la concentración de TnT después del entrenamiento fuera progresivamente más elevada a medida que el porcentaje de pérdida de velocidad en la serie fuera mayor. Por tanto, nuestros resultados sugieren que los cambios en la TnT podrían reflejar las diferencias en el grado de fatiga experimentado por cada grupo experimental durante las sesiones de entrenamiento.

En cuanto a las concentraciones hormonales, solo los grupos  $PV_{media}$  y  $PV_{mayor}$  mostraron un descenso significativos en la concentración basal de prolactina y GH, respectivamente. Las concentraciones basales del resto de hormonas analizadas no mostraron variaciones significativas para ninguno de los tres grupos experimentales. Sin embargo, muchas de ellas alcanzaron importantes porcentajes de cambio. Por ejemplo, la concentración basal de GH aumento un ~24% en el grupo  $PV_{menor}$  y un ~77% en el grupo  $PV_{media}$ , mientras que el grupo  $PV_{mayor}$  experimentó un descenso en la concentración basal de GH (~ -39%). Así, dado que una mayor pérdida de velocidad o mayor número de repeticiones por serie parece que induce un mayor grado de hipertrofia muscular (Bird, et al., 2005; Fink, Kikuchi, & Nakazato, 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016b; Schoenfeld, Ogborn, & Krieger, 2017), y que la GH es una de las principales hormonas relacionadas con el crecimiento muscular (Crewther, Keogh, Cronin, & Cook, 2006; Fry & Kraemer, 1997; Kraemer & Ratamess, 2005), se podría esperar que el incremento en la concentración basal de GH fuera mayor a medida que incrementa la pérdida de velocidad en la serie. En concordancia con los resultados del **Estudio III.1**, los grupos que alcanzaron una pérdida de velocidad en la serie baja (10 y

15% en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente) y media (30 y 40% en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente), mostraron un aumento en la concentración basal de GH e IGF-1, que fue mayor en el grupo PV<sub>media</sub>. Sin embargo, contrario a lo esperado, el grupo de mayor pérdida de velocidad en la serie (45% y 55% en los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente) resultó en un descenso en las concentraciones basales de GH e IGF-1. Una posible explicación a este hecho puede ser que el alto grado de esfuerzo experimentado en cada sesión de entrenamiento por el grupo PV<sub>mayor</sub> haya sobreestresado el sistema neuroendocrino llevándolo a un estado de agotamiento. En relación con esto, en algunos estudios se ha observado que cuando se realizan entrenamientos de fuerza continuados con un alto volumen de entrenamiento se produce un estado de sobreentrenamiento que hace que los niveles basales de GH e IGF-1 disminuyan (Fry & Kraemer, 1997; Fry et al., 1993; Kraemer & Ratamess, 2005).

De acuerdo con los resultados mostrados en el **Estudio III.1** y los de Izquierdo et al. (2006), en el presente estudio se observó que el grupo que entrenó con una menor pérdida de velocidad en la serie (i.e., menor número de repeticiones) mostró un mayor porcentaje de aumento en la concentración basal de testosterona, mientras que el grupo PV<sub>mayor</sub> se mantuvo prácticamente sin cambios. Estos resultados coinciden también con los de algunas revisiones (Fry & Kraemer, 1997; Kraemer & Ratamess, 2005), que indican que cuando se realizan entrenamientos de fuerza con alto volumen, la concentración basal de testosterona no suele mostrar cambios o puede descender ligeramente. La testosterona se ha asociado con el crecimiento muscular al incrementar la síntesis de proteínas y reducir la degradación de las mismas, además de influir sobre el sistema nervioso a través de la interacción con receptores de las neuronas, el incremento de la cantidad de neurotransmisores liberados, la regeneración de los nervios, el incremento del tamaño del cuerpo celular y el aumento de la longitud y el tamaño de las dendritas (Brooks et al., 1998; Fry & Kraemer, 1997; Kraemer & Ratamess, 2005; Nagaya & Herrera, 1995). Asimismo, se ha encontrado que el nivel de testosterona basal mostró una relación moderada con el incremento de la fuerza (Izquierdo et al., 2006; Ratamess et al., 2005). Por tanto, el mayor aumento en la concentración basal de testosterona junto con el mayor incremento en el cociente testosterona-cortisol experimentado en el grupo PV<sub>menor</sub>, parecen indicar que entrenar con una menor magnitud de pérdida de velocidad en la serie (10% en el ejercicio de

sentadilla completa y 15% en el ejercicio de press de banca) induce una mejora en el estado anabólico del músculo en comparación con aquellos entrenamientos en los que se alcanzan pérdidas de velocidad en la serie superiores al 30% en el ejercicio de sentadilla completa y 40% en el ejercicio de press de banca.

En cuanto a los cambios en el cortisol, nuestros resultados mostraron un descenso progresivo en la concentración basal post-entrenamiento de esta hormona a medida que incrementó el volumen de entrenamiento. El cortisol se considera como la principal hormona de estrés y está asociada con el catabolismo muscular, principalmente en las fibras tipo II (Kraemer, et al., 2002; Kraemer & Ratamess, 2003). Dado que el grupo PV<sub>menor</sub> experimentó un grado de esfuerzo bajo (ver **Estudio II**) durante las sesiones de entrenamiento, era razonable encontrar un descenso o mantenimiento en la concentración basal de cortisol después del periodo de entrenamiento, al igual que ocurrió en el **Estudio III.1** de la presente Tesis. En otros estudio también se ha mostrado que entrenar realizando la mitad de las repeticiones posibles en cada serie de entrenamiento produjo un descenso en la concentración basal de cortisol (Izquierdo, et al., 2006). Sin embargo, los grupo PV<sub>media</sub> y PV<sub>mayor</sub> también mostraron descensos en la concentración basal de cortisol, incluso mayores que los obtenidos por PV<sub>menor</sub>, lo cual está en contra de los resultados de la mayoría de los estudios, que han encontrado que el incremento del volumen de entrenamiento produce un aumento en la concentración basal de esta hormona (Bourguignon, Hoyoux, Reuter, & Franchimont, 1979; Fry, et al., 1993; Hakkinen & Pakarinen, 1991; Hakkinen, Pakarinen, Alen, Kauhanen, & Komi, 1987; Kuipers & Keizer, 1988). Dado que la concentración de cortisol parece estar relacionada con la homeostasis del tejido que implica el metabolismo de las proteínas cuando se produce daño muscular como consecuencia del entrenamiento realizado (Kraemer & Ratamess, 2005), y que las sesiones de entrenamiento llevadas a cabo por PV<sub>media</sub> y PV<sub>mayor</sub> generaban un alto grado de fatiga (ver **Estudio II**), esperábamos encontrar un aumento en la concentración basal de cortisol en estos grupos después del periodo de entrenamiento. Sin embargo, en otros estudios (Alen, Pakarinen, Hakkinen, & Komi, 1988; Kraemer & Ratamess, 2005; Kraemer et al., 1998; Marx et al., 2001) también se han mostrado reducciones en la concentración basal de cortisol después de un periodo de entrenamiento con alta intensidad relativa y alto volumen (6 - 12RM). Estos resultados aparentemente contradictorios se pueden deber a la gran variabilidad inter-sujeto que presenta la concentración basal de cortisol, lo cual impide establecer



una respuesta clara ante determinados esfuerzos. Además, otras variables relacionadas con los protocolos de tomas de muestras de sangre, las horas en las que se toman, la distancia entre los últimos entrenamientos y la toma de las muestras, y los tipos de análisis de las propias hormonas podrían influir también en la disparidad de los resultados.

De todas las hormonas analizadas en el presente estudio y en el **Estudio III.1**, quizás la menos estudiada ha sido la prolactina. Esta hormona se ha relacionado con múltiples funciones como el estrés físico y emocional, la regulación del equilibrio de agua en el organismo, la activación del sistema inmune o la función reproductiva (Hackney, Davis, & Lane, 2016). En relación con el ejercicio físico, algunos estudios han mostrado que el entrenamiento de fuerza hasta el fallo muscular producen un incremento agudo después de finalizar la sesión de entrenamiento (González-Badillo, et al., 2016; Pareja-Blanco, et al., 2016a). Sin embargo, los pocos estudios en los que se han analizado los cambios crónicos producidos por el entrenamiento de fuerza sobre la concentración basal de prolactina han mostrado resultados contradictorios (Hackney, Sharp, Runyan, & Ness, 1989; Wheeler, Wall, Belcastro, & Cumming, 1984). Estas diferencias encontradas en estos estudios se deben probablemente a las diferencias en los protocolos de entrenamiento utilizados (intensidad relativa, volumen, frecuencia de entrenamiento y duración de las sesiones) (Hackney, et al., 2016). En el presente estudio, se encontró un descenso en la concentración basal de prolactina en los tres grupos experimentales, la cual fue mayor para el grupo PV<sub>media</sub>. Sin embargo, en el **Estudio III.1** ambos grupos experimentales mostraron un ligero aumento. Por tanto, parece que, ante entrenamientos con la misma pérdida de velocidad en la serie, usar una intensidad relativa mayor produce mayores incrementos en la concentración basal de prolactina. Esto quiere decir que, el grado de esfuerzo o grado de fatiga inducido durante las sesiones de entrenamiento podría tener influencia sobre la respuesta crónica de la prolactina. A pesar de ello, se necesitan más estudios para conocer cuál podría ser la respuesta crónica de la prolactina ante entrenamientos de fuerza dependiendo de la intensidad y el volumen de entrenamiento.

## **Eficiencia**

Como se puede observar en la **Tabla 53**, para el ejercicio de sentadilla completa, el grupo PV10% mostró mayor eficiencia que los otros dos grupos experimentales, puesto que obtuvo mayores porcentajes de cambio en todas las variables analizadas y realizó un menor número medio de repeticiones en cada serie. El grupo PV30% necesitó aproximadamente entre 2 y 8 veces más repeticiones que PV10% para obtener el mismo porcentaje de mejora, mientras que el grupo PV45% necesitó entre 3 y 14 veces más repeticiones que PV10% para obtener el mismo porcentaje de mejora. Al igual que se pudo observar en el **Estudio III.1**, el número de repeticiones necesario para obtener una unidad de mejora en los grupos PV30% y PV45% comparado con PV10% fue mayor en aquellas acciones de mayor velocidad como el T20, T10, CMJ y VMP<sub>CB</sub>, lo cual refuerza la idea de usar entrenamientos de fuerza con una baja (10-15%) pérdida de velocidad en la serie para la mejora del rendimiento en aquellos deportes donde el salto y capacidad de aceleración son factores determinantes. Si comparamos la eficiencia de entrenar con la misma pérdida de velocidad en la serie pero con distintas intensidades se puede observar cómo el grupo PV10% que entrenó con intensidades relativas del 55-70% 1RM mostró mayor eficiencia en las variables CMJ y T10, mientras que para el resto de variables el entrenamiento con intensidades relativas del 70-85 resultó ligeramente más eficiente. Aunque éste es un parámetro importante a tener en cuenta para programar el entrenamiento de fuerza, el hecho de que el entrenamiento realizado con el 70-85% 1RM presentara una ligera mayor eficiencia que el realizado con el 55-70% 1RM no significa que entrenar con mayores intensidades sea más recomendable. De hecho, como hemos mencionado anteriormente en este mismo apartado, los porcentajes de cambio para la mayoría de las variables analizadas después del periodo de entrenamiento en el ejercicio de sentadilla completa fueron mayores para el grupo que entrenó con el 55-70% 1RM en comparación con el grupo que alcanzó la misma pérdida de velocidad en la serie pero entrenó con intensidades relativas del 70-85% 1RM.

Para el ejercicio de press de banca, a pesar de alcanzar un menor porcentaje de mejora en todas las variables analizadas, el grupo que alcanzó una menor pérdida de velocidad en la serie (PV15%) también mostró una mayor eficiencia de entrenamiento, a pesar de que el grupo PV40% obtuvo mayores porcentajes de aumento en las diferentes variables analizadas. Esto se debió a que el número de repeticiones realizado para alcanzar esas

mejoras fue proporcionalmente menor que las diferencias en el porcentaje de mejora en el grupo PV15% comparado con los grupos PV40% y PV55%. A pesar de ello, las diferencias entre este grupo de menor pérdida de velocidad en la serie y los otros dos grupos experimentales fueron menores que las presentadas para el ejercicio de sentadilla completa (1.5 - 1.8 veces más repeticiones que PV40% y 1.8 - 4.2% veces más repeticiones que el grupo PV55%) (**Tabla 53**). Estas diferencias en la eficiencia del entrenamiento entre la sentadilla completa y el press de banca sugieren que el grado de estímulo para producir respuestas adaptativas semejantes puede ser distinto según el ejercicio entrenado.



### 6.5.4. Conclusiones

Las principales conclusiones del **Estudio III.2** fueron las siguientes:

- Para el ejercicio de sentadilla completa, el grupo PV10% mostró similares o mayores ganancias, según la variable analizada, de fuerza y resistencia muscular que el grupo PV30% y PV45%, mientras que el grupo PV30% alcanzó mejores resultados en estas variables que PV45%.
- Entrenar alcanzando un 10% de pérdida de velocidad en la serie en el ejercicio de sentadilla completa produjo un mayor incremento del rendimiento en acciones de alta velocidad como el salto vertical y el sprint que entrenar con una pérdida de velocidad en la serie del 30% o el 45%.
- El grupo PV30% mostró mayores mejoras en el T10 y T20 que el grupo PV45%, mientras que el grupo PV45% obtuvo mayores ganancias de salto vertical que el grupo PV30%.
- Para el ejercicio de press de banca, el grupo PV40% mostró mayores ganancias de fuerza y VMP ante distintas cargas absolutas que los grupos PV15% y PV55%, mientras que el grupo PV55% obtuvo mayores ganancias en el test de fatiga muscular que los otros dos grupos experimentales.
- Los grupos PV<sub>menor</sub> y PV<sub>media</sub> mostraron un aumento en la activación neural de la musculatura agonista implicada en la sentadilla completa (RF y VL) después del periodo de entrenamiento, mientras que el grupo PV<sub>mayor</sub> resultó en un descenso de la RMS con todas las cargas analizadas tanto en la musculatura analizada durante la sentadilla completa como en la estudiada durante el press de banca (PEC y TRI).
- El grupo que realizó un mayor volumen de entrenamiento mostró un mayor daño muscular (TnT) y un peor balance anabólico-catabólico que los otros dos grupos experimentales.

- El grupo PV<sub>menor</sub> resultó en una mayor eficiencia de entrenamiento que los otros dos grupos experimentales en todas las variables analizadas, principalmente en aquellas relacionadas con una alta velocidad absoluta de ejecución. Del mismo modo, el grupo PV<sub>media</sub> mostró mayor eficiencia que el grupo PV<sub>mayor</sub> para la mejora de todas las variables estudiadas excepto para el CMJ y la 1RM<sub>est</sub>.
- En el ejercicio de sentadilla completa, ante una misma magnitud de pérdida de velocidad en la serie (10, 30 o 45%), entrenar con un rango de intensidades relativas del 55-70% 1RM produce mayores mejoras en la fuerza, el salto y la velocidad en carrera que entrenar con intensidades relativas del 70 - 85% 1RM.
- En el ejercicio de press de banca, para una pérdida de velocidad en la serie del 15 o 40%, entrenar con intensidades relativas del 70-85% de 1RM resultó en mayores ganancias de fuerza que entrenar con intensidades relativas del 55-70% 1RM. Sin embargo, para un pérdida de velocidad en la serie del 55%, entrenar con intensidades relativas del 55-70% de 1RM fue más favorable para la mejora de la fuerza que entrenar con intensidades relativas del 70-85% 1RM.

### 6.5.5. Aplicaciones Prácticas

Al igual que el **Estudio III.1**, los resultados del presente estudio contribuyen de manera importante a la mejora del conocimiento sobre el diseño, la dosificación, la cuantificación y el control del entrenamiento de fuerza, así como a la comprensión del efecto de la *carga* de entrenamiento, entendida ésta como la síntesis global de la *intensidad* y el *volumen*. Como se ha podido deducir del presente estudio, la pérdida de velocidad experimentada durante la serie influye directamente sobre las adaptaciones funcionales, neurales y probablemente estructurales, así como sobre el daño muscular y el estrés hormonal crónico. En relación con el entrenamiento de sentadilla completa, nuestros resultados sugieren que perder un 10% de velocidad en la serie sería recomendable si se pretende mejorar el rendimiento en acciones de alta velocidad como el salto y el sprint. Estos hallazgos tienen importancia práctica para aquellos deportistas cuyo objetivo es desarrollar adaptaciones neuromusculares específicas que permitan mejorar su capacidad de aplicar fuerza en cortos periodos de tiempo de una manera altamente eficiente, sin un grado de fatiga excesivo, que podría interferir con el entrenamiento de otras habilidades técnico-tácticas específicas, y sin un excesivo grado de hipertrofia, que produciría un aumento del peso corporal y un posible efecto negativo en su rendimiento.

Sin embargo, para el ejercicio de press de banca sería recomendable aumentar la pérdida de velocidad en la serie hasta porcentajes próximos al 40%.





# **7. Conclusiones Generales**

## ***General Conclusions***





## 7. Conclusiones Generales / General Conclusions

### ESTUDIO I / STUDY I

---

#### ESTUDIO I.1 / STUDY I.1

- Existe una fuerte relación entre el porcentaje de pérdida de VMP producido dentro de la serie y el porcentaje de repeticiones realizado, para todas las intensidades relativas comprendidas entre 50-85% 1RM, en el ejercicio de press de banca.

*There exists a very close relationship between the percentage of MPV loss incurred in a set and the percentage of performed repetitions, for loads between 50-85 % 1RM, in the BP exercise.*

- Esta relación fue similar para todas las intensidades relativas evaluadas, pero particularmente para aquellas que oscilaron entre el 50-70% 1RM.

*This relationship was very similar for all loads, but particularly for those ranging from 50% to 70% 1RM.*

- Ante unas mismas pérdidas de velocidad en la serie (desde el 15 al 75%), el porcentaje de repeticiones realizado es muy similar para las intensidades relativas comprendidas entre el 50 y el 70% 1RM. Pero ante estas mismas pérdidas de velocidad, el porcentaje de repeticiones realizado aumenta en un 2.5, 5, y 10% ante las intensidades del 75, 80 y 85%, respectivamente.

*The percentage of performed repetitions for a given magnitude of velocity loss reached (from 15 to 75 %) was similar for loads between 50 and 70 % 1RM, but it was progressively greater for 75, 80 and 85% 1RM. But, for the same magnitude of velocity loss reached in the set, the percentage of performed repetitions increases by 2.5, 5, y 10% against loads magnitudes of 75, 80 and 85% 1RM, respectively.*

- El número de repeticiones realizado durante una serie hasta el fallo muscular ante diferentes intensidades relativas (50-85% 1RM) presentó una alta variabilidad inter-sujeto en todas las intensidad relativas analizadas y, en general, no presentó correlación con ninguna de las variables mecánicas y antropométricas analizadas en el presente estudio.

*The number of repetitions performed in a set to failure against different submaximal loads (50–85 % 1RM) showed a high inter-subject variability in all relative intensities analyzed and was, in general, not correlated with any of the anthropometric or mechanical variables assessed.*

- El porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo número que se puede completar ante una pérdida de velocidad determinada mostró una alta fiabilidad absoluta.

*The percentage of performed repetitions with respect to the maximum possible number that can be completed, when a given magnitude of MPV loss is reached in a set, showed a high absolute reliability.*

## ESTUDIO I.2 / STUDY I.2

- La fatiga neuromuscular estimada a través de activaciones dinámicas producida por la realización de una serie hasta el fallo muscular se manifiesta en mayor medida a través de los cambios en la velocidad, la potencia y la producción de fuerza en la unidad de tiempo medida en cortos intervalos de tiempo (MRFD, RFD<sub>0-25</sub>, RFD<sub>0-50</sub>) que a través de los cambios en el pico de fuerza.

*The neuromuscular fatigue estimated during dynamic activations after a single set to muscle failure is manifested to a greater extend through the changes in movement velocity, power output and rate of force development calculated in short time intervals (MRFD, RFD<sub>0-25</sub>, RFD<sub>0-50</sub>) than through the changes in peak force.*

- Del mismo modo, la fatiga neuromuscular estimada a través de activaciones estáticas producida por la realización de una serie hasta el fallo muscular se manifiesta en mayor medida en la producción de fuerza en la unidad de tiempo que en el pico de fuerza.

*Similarly, the neuromuscular fatigue estimated during isometric activations after a single set to muscle failure is manifested to a greater extend through the changes in movement rate of force development than through the changes in peak force.*

- La realización de una serie hasta el fallo muscular con una carga que se puede desplazar inicialmente a una VMP de  $\sim 0.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  (60% 1RM), en el ejercicio de press de banca, produce un estado de fatiga que no desaparece totalmente después de 20 min de recuperación.

*Performing a single set to muscle failure against a individual load that elicited a  $\sim 0.79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  MPV (60% 1RM) in bench press exercise, induces a level of fatigue that lasts for more than 20 min.*

- Cuando se realiza un mismo protocolo de esfuerzo para inducir fatiga, la fuerza y la RFD medidas durante activaciones dinámicas concéntricas y durante activaciones isométricas muestran un grado similar de pérdida y de recuperación tras el esfuerzo.

*When a similar resistance exercise protocol is performed in order to induce fatigue, the force and RFD measured during dynamic and isometric activations show a similar percentage loss and recovery after the effort.*

### ESTUDIO I.3 / STUDY I.3

- El número de repeticiones medio y la pérdida de VMP durante la serie fueron mayores para el ejercicio de press de banca comparado con el de sentadilla completa en las 4 intensidades relativas (50, 60, 70 and 80% 1RM) analizadas.

*The average number of repetitions completed and the average loss of MPV during the set were greater for bench press exercise compared to full squat exercise for the four relative intensities (50, 60, 70 and 80% 1RM) analyzed.*

- Existe una alta relación entre la magnitud de pérdida de VMP en la serie y el porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo que puede completar para todas las intensidades relativas analizadas en ambos ejercicios, press de banca y sentadilla completa.

*There exists a very close relationship between the percentage of MPV loss incurred in a set and the percentage of performed repetitions for all four load magnitudes in both bench press and full squat exercises.*

- El porcentaje de repeticiones realizado cuando se alcanza un determinado valor de pérdida de VMP en la serie (desde el 10% al 65%) fue mayor en el ejercicio de sentadilla completa que en el de press de banca en todas las intensidades relativas utilizadas.

*The percentage of performed repetitions for a given magnitude of velocity loss reached (from 10 to 65 %) was greater in full squat than bench press exercise for all four relative loads used in the present study.*

- Ante una misma intensidad relativa, la fatiga aguda (medida a través de la pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$ ) depende del porcentaje de pérdida de VMP en la serie, no del número de repeticiones realizado en la misma. Por tanto, el grado de fatiga inducido por la realización de una serie hasta el fallo muscular con las 4

intensidades relativas analizadas en el presente estudio fue independiente del número de repeticiones realizado por cada participante.

*For a given relative intensity, the acute fatigue (measured through the loss of VMP attained with the  $L1m\cdot s^{-1}$ ) depends on the velocity loss achieved in the set rather than the number of repetitions completed in such set.*

## ESTUDIO II / STUDY II

---

- Los cambios en las variables mecánicas, metabólicas y de EMG analizadas en el presente estudio fueron mayores a medida que incrementó el porcentaje de pérdida de velocidad en la serie ante la misma intensidad relativa (% 1RM).

*For the same relative intensity, the changes in the mechanical, metabolic and EMG variables analyzed in the present study were greater as the percentage of velocity loss in the set increased.*

- Para una misma pérdida de velocidad en la serie, cuanto menor fue la intensidad relativa utilizada mayor fue el grado de fatiga cuantificado.

*For the same percentage of velocity loss in the set, the lower the relative intensity used, the greater the degree of fatigue quantified.*

- Ante un mismo *índice de esfuerzo*, el grado de fatiga producido es equivalente, independientemente de cuál sea la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad en la serie, al menos cuando la velocidad de la primera repetición oscila entre  $\sim 1.13\text{-}0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  en sentadilla completa y  $\sim 0.93\text{-}0.47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  en press de banca, y las pérdidas de velocidad en la serie fluctúan entre  $\sim 10\text{-}45\%$  en sentadilla completa y  $\sim 15\text{-}55\%$  en press de banca.

*For the same Effort Index, the induced degree of fatigue is equivalent, regardless of the MPV of the first repetition and the loss of MPV in the set, at least when the MPV of the first repetition ranged from  $\sim 1.13\text{-}0.68 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  in full squat exercise and  $\sim 0.9\text{-}0.47 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  in bench press exercise, and the loss of MPV in the set ranged from  $\sim 10\text{-}45\%$  in full squat exercise and  $\sim 15\text{-}55\%$  in bench press exercise.*

- El *índice de esfuerzo* mostró una alta validez como expresión del carácter del esfuerzo, lo cual nos permite avanzar en el conocimiento de la carga (esfuerzo) que se programa y, especialmente, de la carga que se ha generado en cada individuo una vez realizado el entrenamiento.



***The Effort Index showed a high validity as an expression of the level of effort, which allows us to advance in the knowledge of the load (effort) that is programmed and, especially, of the internal load that has been induced in each individual once the training has been performed***

- Las pérdidas de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y de altura de salto vertical (CMJ) reflejan de manera semejante y precisa la fatiga neuromuscular producida por diferentes estímulos o grados de esfuerzo, en un amplio rango de intensidades (50-80% 1RM) y de pérdida de velocidad dentro de la serie (10-45% y 15-55% para los ejercicios de sentadilla completa y press de banca, respectivamente).

***The losses of MPV attained with the  $L1m \cdot s^{-1}$  and CMJ similarly and accurately express the neuromuscular fatigue produced by different training stimuli or degrees of efforts, over a wide range of relative intensities (50 - 80% 1RM ) and velocity losses within the set (10 - 45% and 15 - 55% for full squat and bench press exercises, respectively).***

- Las pérdidas de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y de altura de salto vertical (CMJ) fueron superiores y mostraron una mayor correlación con el *índice de esfuerzo* que los cambios en las variables mecánicas medidas durante el test de carrera en 20 m.

***The losses of MPV attained with the  $L1m \cdot s^{-1}$  and CMJ were greater and these showed a higher relationship with the Effort Index than the changes in the mechanical variables measured during the running sprint test.***

- La concentración sanguínea de lactato post-esfuerzo presentó una alta relación lineal con el *índice de esfuerzo*, y una elevada correlación con todos los tipos de pérdidas mecánicas analizadas, tanto en el ejercicio de sentadilla completa como en el de press de banca. Por tanto, el índice de esfuerzo y las pérdidas mecánicas analizadas (pérdida de velocidad con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y de altura de salto vertical) son precisos predictores del estrés metabólico generado cuando este se estima a través de la concentración de lactato post ejercicio.

*The post-exercise lactate concentration presented a high linear correlation with the Effort Index, and a high relationship with all mechanical losses analyzed in the present study, both in the full squat and in the bench press exercise. Therefore, the Effort Index and the mechanical losses analyzed (mainly, loss of velocity with the  $L1m \cdot s^{-1}$  and vertical jump height) are accurate predictors of the metabolic stress generated when it is estimated through post-exercise lactate concentration.*

- Los cambios en las variables  $F_{med}$ ,  $F_{media}$ , ID y TDW en los dominios 3, 4 y 5 derivadas del registro de EMG en los músculos RF y VL presentaron una relación moderada-alta con el *índice de esfuerzo*, la concentración sanguínea de lactato post-esfuerzo y con los cambios en otras variables mecánicas. Por tanto, el *índice de esfuerzo* puede considerarse un buen indicador para estimar la fatiga neuromuscular producida durante el entrenamiento de fuerza.

*The changes in the electromyography variables  $F_{med}$ ,  $F_{mean}$ , DI and WDT in domains 3, 4 and 5 from the RF and VL muscles presented a moderate to high relation with the Effort Index, post-exercise blood lactate concentration and changes in other mechanical variables. Therefore, the Effort Index can be considered a good indicator to estimate the neuromuscular fatigue produced during resistance training.*

## ESTUDIO III / STUDY III

---

### ESTUDIO III.1 / STUDY III.1

- Para el ejercicio de sentadilla completa, el grupo PV10% mostró similares o mayores ganancias, según la variable analizada, de fuerza y resistencia muscular, y mayores mejoras del rendimiento en salto vertical y velocidad en carrera que el grupo PV30%.

*For the full squat exercise, the VL10% showed similar or even greater gains in strength and muscle endurance, according to the analyzed variable, and greater improvements in CMJ and sprint performance than VL30%.*

- Para el ejercicio de press de banca, el grupo PV40% mostró mayores ganancias de fuerza y resistencia muscular que el grupo PV15%.

*For the bench press exercise, the VL40% showed similar or even greater gains in strength and muscle endurance than VL15%.*

- Entrenar con un menor grado de fatiga durante cada serie (10% en sentadilla completa y 15% en press de banca) resultó en una mayor activación neural de la musculatura agonista implicada en la sentadilla completa (RF y VL) y en el press de banca (PEC y TRI), como se deduce del aumento de las variables de EMG analizadas. Sin embargo, entrenar alcanzando un mayor grado de pérdida de velocidad en la serie (30% en sentadilla completa y 40% en press de banca) solo produjo ligeros cambios en la  $F_{med}$  y la  $F_{max}$  de la musculatura implicada en el press de banca, mientras que la EMG del cuádriceps se mantuvo sin cambios después de las 8 semanas de entrenamiento.

*Training with a low velocity loss in the set (10% in full squat and 15% in bench press exercise) resulted in greater neural activation of agonist muscles involved in full squat (RF and VL) and bench press exercise (PEC and TRI) after the intervention period. However, training with a high percentage of velocity loss in*

*the set (30% in full squat and 40% in bench press exercise) only induced slight changes in Fmed and Fmax in PEC and TRI muscles, whereas the quadriceps EMG remained unchanged.*

- Por último, el grupo que realizó un mayor volumen de entrenamiento mostró un mayor daño muscular y estrés hormonal, y un peor balance anabólico-catabólico. Sin embargo, entrenar con un mayor volumen de entrenamiento también produjo un mayor aumento de diferentes hormonas anabólicas (GH y IGF-1), lo cual pudo estar asociado con un mayor grado de hipertrofia muscular.

*Training group performing a higher training volume showed greater muscle damage and hormonal stress, and worse anabolic-catabolic balance. However, training performing a higher volume also induced greater increases in different anabolic hormones (GH y IGF-1), which could be associated with a greater degree of muscular hypertrophy.*

## **ESTUDIO III.2 / STUDY III.2**

- Para el ejercicio de sentadilla completa, el grupo PV10% mostró similares o mayores ganancias, según la variable analizada, de fuerza y resistencia muscular, y mayores mejoras del rendimiento en salto vertical y velocidad en carrera que los grupos PV30% y PV45%.

*For the full squat exercise, the VL10% showed similar or even greater gains in strength and muscle endurance, according to the analyzed variable, and greater improvements in CMJ and sprint performance than VL30% and VL45%.*

- El grupo PV30% 10% de pérdida de velocidad en la serie en el ejercicio de sentadilla completa produjo un mayor incremento del rendimiento en acciones de alta velocidad como el salto vertical y el sprint que entrenar con una pérdida de velocidad en la serie del 30% o el 45%.

***The VL30% showed greater gains in strength, muscle endurance and sprint performance than the VL45%, whereas the VL45% resulted in higher CMJ improvements than the VL30%.***

- Para el ejercicio de press de banca, el grupo PV40% mostró mayores ganancias de fuerza y VMP ante distintas cargas absolutas que los grupos PV15% y PV55%, mientras que el grupo PV55% obtuvo mayores ganancias en el test de fatiga muscular que los otros dos grupos experimentales.

***For the bench press exercise, the VL40% showed greater gains in strength and MPV against different absolute loads than the VL15% and the VL55%, whereas the VL55% obtained higher gains in the muscle fatigue test compared to the other two experimental groups.***

- Los grupos PV<sub>menor</sub> y PV<sub>media</sub> mostraron un aumento en la activación neural de la musculatura agonista implicada en la sentadilla completa (RF y VL) después del periodo de entrenamiento, mientras que el grupo PV<sub>mayor</sub> resultó en un descenso de la RMS con todas las cargas analizadas tanto en la musculatura analizada durante la sentadilla completa como en la estudiada durante el press de banca (PEC y TRI).

***Training with a low (10% in full squat and 15% in bench press exercise) and medium (30% in full squat and 40% in bench press exercise) velocity loss in the set resulted in greater neural activation of agonist muscles involved in full squat (RF and VL) after the intervention period, whereas training with a high (45% in full squat and 55% in bench press exercise) velocity loss in the set showed a RMS decreases against all absolute loads analyzed, both in muscle groups involved in full squat and bench press exercise.***

- El grupo que realizó un mayor volumen de entrenamiento mostró un mayor daño muscular (TnT) y un peor balance anabólico-catabólico que los otros dos grupos experimentales.

***Training group performing a higher training volume showed greater muscle damage and worse anabolic-catabolic balance than the other two experimental groups.***

- El grupo PV<sub>menor</sub> resultó en una mayor eficiencia de entrenamiento que los otros dos grupos experimentales en todas las variables analizadas, principalmente en aquellas relacionadas con una alta velocidad absoluta de ejecución. Del mismo modos, el grupo PV<sub>media</sub> mostró mayor eficiencia que el grupo PV<sub>mayor</sub> para la mejora de todas las variables estudiadas excepto para el CMJ y la 1RM<sub>est</sub>.

***Training group performing a lower training volume resulted in greater training efficiency than the other two experimental groups in all variables analyzed, mainly in those related to a high absolute speed of execution. Similarly, the training group performing a medium training volume showed higher training efficiency than the training group performing a high training volume for all variables except to CMJ and 1RM<sub>est</sub>.***

- En el ejercicio de sentadilla completa, ante una misma magnitud de pérdida de velocidad en la serie (10, 30 y 45%), entrenar con un rango de intensidades relativas del 55-70% 1RM produce mayores mejoras en la fuerza, el salto y la velocidad en carrera que entrenar con intensidades relativas del 70-85% 1RM.

***In the full squat exercise, for the same percentage of velocity loss in the set (10, 30, and 45%), training with relative intensities ranging from 55-70% 1RM produces greater improvements in muscle strength, CMJ and sprint performance than training with relative loads ranging from 70-85% 1RM.***

- En el ejercicio de press de banca, para una pérdida de velocidad en la serie del 15% o 40%, entrenar con intensidades relativas del 70-85% 1RM resultó en mayores ganancias de fuerza que entrenar con intensidades relativas del 55-70% 1RM. Sin embargo, para un pérdida de velocidad en la serie del 55%, entrenar con intensidades relativas del 55-70% 1RM fue más favorable para la mejora de la fuerza que entrenar con intensidades relativas del 70-85% 1RM.

*In the bench press exercise, for velocity losses in the set of 15% and 40%, training with relative intensities ranging from 70 - 85% 1RM resulted in greater muscle strength gains than training with relative loads ranging from 55 - 70% 1RM. However, for a velocity loss in the set of 55%, training with relative intensities ranging from 55 - 70% 1RM resulted in greater beneficial effect on muscle strength than training with relative loads ranging from 70 - 85% 1RM.*





## **8. Aplicaciones Prácticas Generales**

### **General Practical Applications**





## 8. Aplicaciones Prácticas Generales / General Practical Applications

### ESTUDIO I / STUDY I

---

- Dada la fuerte relación entre la pérdida de VMP en la serie con (1) el porcentaje de repeticiones realizado con respecto a las repeticiones posibles en la serie durante una serie realizada hasta el fallo con distintas intensidades relativas (50-80% 1RM) y diferentes ejercicios (sentadilla completa y press de banca); (2) y la fatiga, así como la alta fiabilidad absoluta que muestra el porcentaje de repeticiones realizado para cada magnitud de pérdida de VMP en la serie, se recomienda controlar el volumen de entrenamiento durante el ejercicio de fuerza a través de la pérdida de VMP en la serie. De este modo, en vez de prescribir un número predeterminado de repeticiones por serie, parece más adecuado terminar cada serie de entrenamiento tan pronto como se detecte un cierto nivel de fatiga (el cual dependerá de objetivo del entrenamiento).

*Considering the strong correlation between the relative loss of MPV in the set and (1) the percentage of repetitions performed with respect to the maximum possible number that can be completed in a single set to failure against different relative intensities (50-80% 1RM) and exercises (full squat and bench press); and (2) the degree of fatigue induced after a such single set to muscle failure, as well as the high absolute reliability shown by the percentage of repetitions performed for each magnitude of MPV loss in the set, it is recommended monitoring the training volume during resistance exercises through the MPV loss in the set. Thus, rather than performing a fixed, predetermined, number of repetitions, it seems more appropriate to stop or terminate each training set as soon as a certain level of neuromuscular fatigue is detected (which, in turn, will depend on the specific goal being pursued).*

- Además, las diferencias encontradas en el porcentaje de repeticiones realizado para cada porcentaje de pérdida de VMP analizado entre las distintas intensidades

relativas y los diferentes ejercicios usados en el presente estudio, indican que se deberían tener en cuenta también estos factores (intensidad y tipo de ejercicio) cuando se prescribe el volumen de entrenamiento a través de la pérdida de VMP en cada serie.

*In addition, the differences found in the percentage of performed repetitions for a given percentage of MPV loss between the different relative intensities and exercises used in the present study suggest that these factors (relative intensity and type of exercise) should also be taken into account when the training volume is prescribed through the loss of VMP in each training set.*

- Los resultados de este estudio confirman que, si se pretende evaluar el grado de fatiga que ha producido un determinado tipo de esfuerzo, se debería controlar la pérdida de velocidad o RFD y el tiempo de recuperación de dichas variables, más que la pérdida de fuerza.

*The results of the present study suggest that, if it is intended to assess the degree of fatigue that a certain type of effort has produced, it should be controlled the loss of MPV or RFD and the recovery time of these variables, rather than the loss of force.*

- Se recomienda que el grado de fatiga y de recuperación producido después de un ejercicio de fuerza se midan mediante activaciones dinámicas.

*It is recommended that the degree of fatigue and recovery produce after a resistance exercise be measured through dynamic activations.*

- En caso de cuantificar el grado de fatiga y de recuperación después de un esfuerzo a través de activaciones estáticas, sería conveniente evaluar y controlar variables relacionadas con la producción de fuerza en la unidad de tiempo, en vez del pico de fuerza isométrica máxima, para conocer el grado de recuperación después de una serie o sesión de entrenamiento.

- *When the degree of fatigue and recovery after a resistance exercise is quantify through isometric activations, rather than the maximum isometric force, it would be convenient to assess and monitoring variables related to the rapid rate of force development in order to know the degree of recovery after a single set or training session.*

---

## ESTUDIO II / STUDY II

---

- Las altas correlaciones encontradas entre el *índice de esfuerzo* y los cambios en las variables mecánicas, metabólicas y de EMG parecen indicar que el índice propuesto es un indicador válido de la fatiga neuromuscular inducida durante el entrenamiento de fuerza. Por tanto, una vez determinado el grado de fatiga que se quiere generar en el sujeto, debería programarse el entrenamiento (la *carga*) tomando como referencia la velocidad de la primera repetición en la serie y la pérdida de velocidad dentro de la serie.

*The strong relationships between the Effort Index and the changes in different mechanical, metabolic and electromyography variables seem to indicate that the purposed index is a valid indicator of the induced neuromuscular fatigue during resistance training. Therefore, once determined the degree of fatigue that we want to induce in the subject, resistance training should be programmed based on the MPV of the first repetition in the set and the percentage of MPV loss within the set.*

- Para nuestro conocimiento, el *índice de esfuerzo* es el precursor más preciso del grado de fatiga inducido durante el entrenamiento de fuerza. Por tanto, si quisiéramos comparar el efecto de distintos rangos de intensidad relativas (% 1RM) sobre los cambios en fuerza o en otros tipos de rendimiento, habría que asegurar que el *índice de esfuerzo* fuera equivalente para los distintos programas de entrenamiento, y para ello sería necesario que las pérdidas de velocidad en la serie o sesión fueran distintas para cada intensidad relativa utilizada en los distintos programas de entrenamiento, de forma que los esfuerzos realizados fueran semejantes.

*To the best of our knowledge, the Effort Index is the most accurate precursor of the degree of fatigue induced during resistance training. Therefore, if we wanted to compare the effect of different relative intensity ranges (% 1RM) on changes in muscle strength or in other types of performance, it would have to be ensured that the Effort Index was equivalent for the different training programs used. This*

*would require that the percentage of velocity loss in the set or session was different for each relative intensity used in the different training programs, so that the efforts made were similar.*

- Dada la mayor sensibilidad y relación con el *índice de esfuerzo* de la lactatemia post-esfuerzo y las pérdida de VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y de altura de salto en comparación con los cambios en las variables medidas durante el test de carrera en 20 m y los cambios en las variables de EMG, es preferible utilizar las pérdidas pre-post esfuerzo en estas dos variables (VMP con la  $C1m \cdot s^{-1}$  y CMJ) para estimar el grado de fatiga inducido por el entrenamiento de fuerza.

*Considering the greater correlation between the Effort Index and post-effort blood lactate concentration and the losses of MPV against the  $L1m \cdot s^{-1}$  and CMJ compared to the changes in the mechanical variables measured during the running sprint test and electromyography variables, it is recommended to use the pre-post effort losses in these two variables (MPV against the  $L1m \cdot s^{-1}$  and CMJ) in order to estimate the degree of fatigue induced by resistance training.*

---

## ESTUDIO III / STUDY III

---

- En relación con el entrenamiento de sentadilla completa, nuestros resultados sugieren que perder un 10% de velocidad en la serie sería recomendable si se pretende mejorar el rendimiento en acciones de alta velocidad como el salto y el sprint.

*In relation to the full squat exercise training, our results suggest that it is recommended to reach a 10% of MPV loss in the set when the goal of resistance training is to improve the performance in high-speed actions such as jumping and sprinting.*

- A diferencia del ejercicio de sentadilla completa, para el ejercicio de press de banca, parece que las mayores ganancias de fuerza se obtienen cuando se entrena alcanzando un porcentaje de pérdida de velocidad en la serie próximo al 40%.

*Unlike the results observed in relation to full squat exercise training, for bench press exercise training, our results seem to indicate that the greater strength gains is obtained when training sets are performed achieving a percentage of MVP loss in the set near to 40%.*

- Además, considerando las diferencias encontradas en el porcentaje de cambio de cada una de las variables, tanto en el ejercicio de sentadilla completa como en el de press de banca, con cada porcentaje de pérdida de velocidad en la serie dependiendo del rango de intensidades relativas utilizado, otra importante aplicación práctica derivada de nuestro estudio es que la programación de la pérdida de velocidad permitida en cada serie de entrenamiento con el objetivo de mejorar el rendimiento neuromuscular es específica de cada ejercicio y cada intensidad relativa.

*In addition, considering the differences found in the percentage of change for each variable analyzed, both in the full squat and bench press exercise, with the different percentages of MPV loss in the set depending on the range of relative intensities used, another important practical application derived from our study is*



*that the MPV loss allowed in each set during training programs aimed to improve neuromuscular performance should be specific to each exercise and each relative intensity.*



# **9. Limitaciones de la Investigación**





## 9. Limitaciones de la Investigación

La principal limitación de los estudios que componen la presente Tesis Doctoral es la posible realización de actividad física ajena a las sesiones de evaluación y/o entrenamiento programadas para cada estudio por parte de los participantes. Aunque se les pidió que no realizaran ninguna otra actividad física vigorosa durante el tiempo que durara la investigación, este aspecto es casi imposible de controlar de manera rigurosa, ya que todos los participantes eran estudiantes del Grado en Ciencias de la Actividad Física y el Deporte y, consecuentemente, eran exigidos a realizar ciertas prácticas deportivas en los contenidos impartidos en dicho grado. No obstante, esta limitación queda en parte controlada por la alta probabilidad de que el grado de actividad ajeno al entrenamiento programado se haya distribuido de manera equivalente en todos los grupos.

Lógicamente, los resultados mostrados en la presente Tesis son aplicables a sujetos con un rendimiento y un grado de entrenamiento similar a los que poseían los participantes de los diferentes estudios realizados. En este sentido, queda pendiente aplicar estos mismos estímulos en diferentes poblaciones de deportistas que tengan diferentes necesidades de fuerza y de otros componentes físicos como la resistencia.

Aparte de las mediciones de variables cinéticas y cinemáticas realizadas para la estimación del grado de fatiga durante el **Estudio I.2**, no se pudo registrar la actividad eléctrica muscular con el fin de conocer si existen diferencias en función del tipo de activación utilizada: dinámica y estática. También queda pendiente la aplicación del **Estudio I** en otros ejercicios y con otras intensidades relativas.

La medición de la respuesta hormonal aguda y a corto plazo (24 - 48 h post-esfuerzo), y de otros marcadores metabólicos como la CK o el amonio nos hubiera dado información relevante para conocer mejor el efecto fisiológico producido por cada uno de los estímulos aplicados en el **Estudio II**. Además, la medición de variables cinéticas, obtenidas con una plataforma de fuerza, nos hubiera permitido conocer mejor el efecto mecánico y el grado de recuperación después de cada esfuerzo.

La principal limitación de los estudios que componen el **Estudio III** de la presente Tesis es que no se midieron variables relacionadas con los cambios estructurales. De este modo, la medición de los cambios en hipertrofia muscular, el tipo y proporción de fibras

musculares, la rigidez musculotendinosa o el ángulo de penneación nos hubiera proporcionado una visión más completa del efecto producido por la manipulación de la pérdida de velocidad en la serie ante distintas intensidades relativas.

Los hallazgos obtenidos en el **Estudio III** solo pueden contextualizarse en los ejercicios analizados (sentadilla completa y press de banca), siendo necesario confirmar los resultados en otros ejercicios que también se utilizan habitualmente en el entrenamiento de fuerza como la cargada, el salto con carga, las dominadas o la combinación de varios ejercicios. Del mismo modo, queda pendiente de analizar el efecto del entrenamiento sobre otros ejercicios como el cambio de dirección, el golpeo de balón o el lanzamiento.

Dado que hubo una tendencia a que la menor pérdida de velocidad en la serie (10%) en el entrenamiento de sentadilla completa mostrara los mejores resultados, queda pendiente de conocer la tendencia del efecto que hubiera producido en el **Estudio III** una menor pérdida de velocidad en la serie, lo que permitiría conocer mejor la relación *volumen-rendimiento*, entendiendo volumen como grado de fatiga.

Debido al pequeño tamaño muestral (10 - 12 participantes por grupo) no podemos descartar un *error tipo II* cuando comparamos entre grupos en el **Estudio III**. De hecho, en algunas variables se alcanzaron diferencias porcentuales entre-grupos importantes aunque sin llegar a alcanzar diferencias estadísticamente significativas. Esto quiere decir, que con un mayor tamaño muestral es probable que se hubieran encontrado mayores diferencias que las mostradas en ambos estudios.

# 10. Futuras Líneas de Investigación







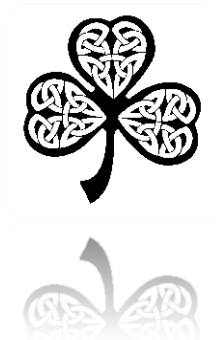
## **10. Futuras Líneas de Investigación**

Tras las conclusiones obtenidas en los diferentes estudios que conforman la presente Tesis Doctoral, y una vez examinada la utilidad de la velocidad de ejecución como variable de referencia para el control y la dosificación del entrenamiento, así como los efectos agudos y crónicos de la manipulación de la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad en la serie sobre una amplia gama de variables relacionadas con el rendimiento físico y el efecto neuromuscular, el avance en la metodología y práctica del entrenamiento deportivo, en particular del entrenamiento de la fuerza, pasan por seguir realizando estudios que nos permitan examinar mejor los efectos tanto agudos como a medio y largo plazo de la realización de diferentes programas de entrenamiento en los que la variable independiente sea la velocidad de ejecución. En este sentido, algunas de las cuestiones a resolver en un futuro serían:

- Analizar la relación entre la magnitud de pérdida de velocidad en la serie y el porcentaje de repeticiones realizado durante una serie hasta el fallo muscular con intensidades relativas inferiores al 50% 1RM y superiores al 80-85% 1RM en los ejercicios de press de banca y sentadilla completa.
- Analizar la relación entre la magnitud de pérdida de velocidad en la serie y el porcentaje de repeticiones realizado durante una serie hasta el fallo muscular, o hasta una pérdida determinada, ante distintas intensidades relativas en otros ejercicios usados tradicionalmente en el entrenamiento de fuerza como la cargada, las dominadas, las tracciones, el peso muerto o el salto con carga.
- Comprobar el cambio en la actividad eléctrica muscular a medida que aumenta la pérdida de velocidad durante una serie realizada hasta el fallo muscular.
- Comprobar la respuesta aguda (hormonal y señalización molecular de vías relacionadas con la síntesis y con la degradación de proteínas musculares) ante diferentes estímulos determinados por la velocidad de la primera repetición y la pérdida de velocidad en la serie en diferentes ejercicios.

- Comprobar el efecto de diferentes programas de entrenamiento de fuerza con un mismo *índice de esfuerzo* pero con distintas intensidades relativas (velocidad de la primera repetición de la serie) y pérdidas de velocidad permitidas en cada serie.
- Examinar el efecto de diferentes programas de entrenamiento con distintas pérdidas de velocidad en la serie ante rango de intensidades inferiores al 55% 1RM.
- Comprobar los efectos sobre la hipertrofia y los cambios en el fenotipo muscular ante esfuerzos con distintas intensidades relativas y pérdidas de velocidad en la serie.

# 11. Referencias Bibliográficas





## 11. Referencias Bibliográficas

- Aagaard, P. (2003). Training-induced changes in neural function. *Exerc Sport Sci Rev*, 31(2), 61-67.
- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, P., & Dyhre-Poulsen, P. (2002a). Increased rate of force development and neural drive of human skeletal muscle following resistance training. *J Appl Physiol*, 93(4), 1318-1326.
- Aagaard, P., Simonsen, E. B., Andersen, J. L., Magnusson, P., & Dyhre-Poulsen, P. (2002b). Neural adaptation to resistance training: changes in evoked V-wave and H-reflex responses. *J Appl Physiol*, 92(6), 2309-2318.
- Abernethy, P. J., & Jurimae, J. (1996). Cross-sectional and longitudinal uses of isoinertial, isometric, and isokinetic dynamometry. *Med Sci Sports Exerc*, 28(9), 1180-1187.
- Abreu, E. L., Cheng, A. L., Kelly, P. J., Chertoff, K., Brotto, L., Griffith, E., Kinder, G., Uridge, T., Zachow, R., & Brotto, M. (2014). Skeletal muscle troponin as a novel biomarker to enhance assessment of the impact of strength training on fall prevention in the older adults. *Nurs Res*, 63(2), 75-82.
- Adamson, M., Macquaide, N., Helgerud, J., Hoff, J., & Kemi, O. J. (2008). Unilateral arm strength training improves contralateral peak force and rate of force development. *Eur J Appl Physiol*, 103(5), 553-559.
- Ahtiainen, J. P., & Hakkinen, K. (2009). Strength athletes are capable to produce greater muscle activation and neural fatigue during high-intensity resistance exercise than nonathletes. *J Strength Cond Res*, 23(4), 1129-1134.
- Ahtiainen, J. P., Pakarinen, A., Alen, M., Kraemer, W. J., & Hakkinen, K. (2003). Muscle hypertrophy, hormonal adaptations and strength development during strength training in strength-trained and untrained men. *Eur J Appl Physiol*, 89(6), 555-563.
- Ahtiainen, J. P., Pakarinen, A., Alen, M., Kraemer, W. J., & Hakkinen, K. (2005). Short vs. long rest period between the sets in hypertrophic resistance training: influence on muscle strength, size, and hormonal adaptations in trained men. *J Strength Cond Res*, 19(3), 572-582.

- Ahtiainen, J. P., Pakarinen, A., Kraemer, W. J., & Hakkinen, K. (2003). Acute hormonal and neuromuscular responses and recovery to forced vs maximum repetitions multiple resistance exercises. *Int J Sports Med*, 24(6), 410-418.
- Ahtiainen, J. P., Pakarinen, A., Kraemer, W. J., & Hakkinen, K. (2004). Acute hormonal responses to heavy resistance exercise in strength athletes versus nonathletes. *Can J Appl Physiol*, 29(5), 527-543.
- Akima, H., & Saito, A. (2013). Activation of quadriceps femoris including vastus intermedius during fatiguing dynamic knee extensions. *Eur J Appl Physiol*, 113(11), 2829-2840.
- Akima, H., Takahashi, H., Kuno, S. Y., Masuda, K., Masuda, T., Shimojo, H., Anno, I., Itai, Y., & Katsuta, S. (1999). Early phase adaptations of muscle use and strength to isokinetic training. *Med Sci Sports Exerc*, 31(4), 588-594.
- Alen, M., Pakarinen, A., Hakkinen, K., & Komi, P. V. (1988). Responses of serum androgenic-anabolic and catabolic hormones to prolonged strength training. *Int J Sports Med*, 9(3), 229-233.
- Ali Hammami, M., Abderrahman, A. B., Hackney, A. C., Kebsi, W., Owen, A. L., Nebigh, A., Racil, G., Tabka, Z., & Zouhal, H. (2016). Hormonal (cortical-gonadotropic axis) and physical changes with two years intense exercise training in elite young soccer players. *J Strength Cond Res*.
- Allen, D. G., Lamb, G. D., & Westerblad, H. (2008). Skeletal muscle fatigue: cellular mechanisms. *Physiol Rev*, 88(1), 287-332.
- Allen, D. G., & Trajanovska, S. (2012). The multiple roles of phosphate in muscle fatigue. *Front Physiol*, 3, 463.
- Andersen, L. L., Andersen, J. L., Magnusson, S. P., Suetta, C., Madsen, J. L., Christensen, L. R., & Aagaard, P. (2005). Changes in the human muscle force-velocity relationship in response to resistance training and subsequent detraining. *J Appl Physiol*, 99(1), 87-94.
- Andersen, L. L., Andersen, J. L., Zebis, M. K., & Aagaard, P. (2010). Early and late rate of force development: differential adaptive responses to resistance training? *Scand J Med Sci Sports*, 20(1), e162-169.

- Anderson, T., & Kearney, J. T. (1982). Effects of three resistance training programs on muscular strength and absolute and relative endurance. *Res Q Exerc Sport*, 53(1), 1-7.
- Arendt-Nielsen, L., & Mills, K. R. (1988). Muscle fibre conduction velocity, mean power frequency, mean EMG voltage and force during submaximal fatiguing contractions of human quadriceps. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 58(1-2), 20-25.
- Asmussen, E. (1979). Muscle fatigue. *Med Sci Sports*, 11(4), 313-321.
- Assumpcao, C. O., Tibana, R. A., Viana, L. C., Willardson, J. M., & Prestes, J. (2013). Influence of exercise order on upper body maximum and submaximal strength gains in trained men. *Clin Physiol Funct Imaging*, 33(5), 359-363.
- Atha, J. (1981). Strengthening muscle. *Exerc Sport Sci Rev*, 9, 1-73.
- Atkinson, G., & Nevill, A. M. (1998). Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Med*, 26(4), 217-238.
- Augustsson, J., Thomee, R., Linden, C., Folkesson, M., Tranberg, R., & Karlsson, J. (2006). Single-leg hop testing following fatiguing exercise: reliability and biomechanical analysis. *Scand J Med Sci Sports*, 16(2), 111-120.
- Babault, N., Desbrosses, K., Fabre, M. S., Michaut, A., & Pousson, M. (2006). Neuromuscular fatigue development during maximal concentric and isometric knee extensions. *J Appl Physiol*, 100(3), 780-785.
- Baker, D., Wilson, G., & Carlyon, R. (1994). Periodization: the effect on strength of manipulating volume and intensity. *J Strength Cond Res*, 8, 235-242.
- Baker, D. G., & Newton, R. U. (2007). Change in power output across a high-repetition set of bench throws and jump squats in highly trained athletes. *J Strength Cond Res*, 21(4), 1007-1011.
- Bangsbo, J., Norregaard, L., & Thorso, F. (1991). Activity profile of competition soccer. *Can J Sport Sci*, 16(2), 110-116.
- Barry, B. K., & Enoka, R. M. (2007). The neurobiology of muscle fatigue: 15 years later. *Integr Comp Biol*, 47(4), 465-473.

- Batterham, A. M., & Hopkins, W. G. (2006). Making meaningful inferences about magnitudes. *Int J Sports Physiol Perform*, 1(1), 50-57.
- Bazyler, C. D., Beckham, G. K., & Sato, K. (2015). The use of the isometric squat as a measure of strength and explosiveness. *J Strength Cond Res*, 29(5), 1386-1392.
- Beck, T. W., Housh, T. J., Johnson, G. O., Weir, J. P., Cramer, J. T., Coburn, J. W., & Malek, M. H. (2005). Comparison of Fourier and wavelet transform procedures for examining the mechanomyographic and electromyographic frequency domain responses during fatiguing isokinetic muscle actions of the biceps brachii. *J Electromyogr Kinesiol*, 15(2), 190-199.
- Behm, D. G. (1995). Neuromuscular implications and applications of resistance training. *J Strength Cond Res*, 9(4), 264-274.
- Behm, D. G., & Sale, D. G. (1993). Intended rather than actual movement velocity determines velocity-specific training response. *J Appl Physiol (1985)*, 74(1), 359-368.
- Behringer, M., Vom Heede, A., Yue, Z., & Mester, J. (2010). Effects of resistance training in children and adolescents: a meta-analysis. *Pediatrics*, 126(5), e1199-1210.
- Berger, R. A. (1962). Effect of varied weight training programs on strength. *Res Q*, 33(2), 168-181.
- Berger, R. A. (1965). Comparison of the effect of various weight training loads on strength. *Res Q*, 36, 141-146.
- Berger, R. A. (1972). Effect of varied sets of static training on dynamic strength. *Am Correct Ther J*, 26(2), 52-54.
- Bigland-Ritchie, B., Donovan, E. F., & Roussos, C. S. (1981). Conduction velocity and EMG power spectrum changes in fatigue of sustained maximal efforts. *J Appl Physiol Respir Environ Exerc Physiol*, 51(5), 1300-1305.
- Bigland-Ritchie, B., Furbush, F., & Woods, J. J. (1986). Fatigue of intermittent submaximal voluntary contractions: central and peripheral factors. *J Appl Physiol (1985)*, 61(2), 421-429.



- Bigland-Ritchie, B., Johansson, R., Lippold, O. C., & Woods, J. J. (1983). Contractile speed and EMG changes during fatigue of sustained maximal voluntary contractions. *J Neurophysiol*, 50(1), 313-324.
- Bigland-Ritchie, B., Rice, C. L., Garland, S. J., & Walsh, M. L. (1995). Task-dependent factors in fatigue of human voluntary contractions. *Adv Exp Med Biol*, 384, 361-380.
- Bigland, B., & Lippold, O. C. (1954). The relation between force, velocity and integrated electrical activity in human muscles. *J Physiol*, 123(1), 214-224.
- Bird, S. P., Tarpenning, K. M., & Marino, F. E. (2005). Designing resistance training programmes to enhance muscular fitness: a review of the acute programme variables. *Sports Med*, 35(10), 841-851.
- Blimkie, C. J. (1993). Resistance training during preadolescence. Issues and controversies. *Sports Med*, 15(6), 389-407.
- Bosco, C. (1998). A new Ergopower training method: The Bosco system. *Modern Athlete Coach*, 36(4), 13-16.
- Bosco, C., Colli, R., Bonomi, R., von Duvillard, S. P., & Viru, A. (2000). Monitoring strength training: neuromuscular and hormonal profile. *Med Sci Sports Exerc*, 32(1), 202-208.
- Bosquet, L., Montpetit, J., Arvisais, D., & Mujika, I. (2007). Effects of tapering on performance: a meta-analysis. *Med Sci Sports Exerc*, 39(8), 1358-1365.
- Bourguignon, J. P., Hoyoux, C., Reuter, A., & Franchimont, P. (1979). Urinary excretion of immunoreactive luteinizing hormone-releasing hormone-like material and gonadotropins at different stages of life. *J Clin Endocrinol Metab*, 48(1), 78-84.
- Braam, K. I., van Dijk-Lokkart, E. M., Kaspers, G. J., Takken, T., Huisman, J., Bierings, M. B., Merks, J. H., van de Heuvel-Eibrink, M. M., van Dulmen-den Broeder, E., & Veening, M. A. (2016). Cardiorespiratory fitness and physical activity in children with cancer. *Support Care Cancer*, 24(5), 2259-2268.
- Braith, R. W., Graves, J. E., Leggett, S. H., & Pollock, M. L. (1993). Effect of training on the relationship between maximal and submaximal strength. *Med Sci Sports Exerc*, 25(1), 132-138.

- Brody, L. R., Pollock, M. T., Roy, S. H., De Luca, C. J., & Celli, B. (1991). pH-induced effects on median frequency and conduction velocity of the myoelectric signal. *J Appl Physiol* (1985), 71(5), 1878-1885.
- Brooks, B. P., Merry, D. E., Paulson, H. L., Lieberman, A. P., Kolson, D. L., & Fischbeck, K. H. (1998). A cell culture model for androgen effects in motor neurons. *J Neurochem*, 70(3), 1054-1060.
- Bruton, J. D., Lannergren, J., & Westerblad, H. (1998). Effects of CO<sub>2</sub>-induced acidification on the fatigue resistance of single mouse muscle fibers at 28 degrees C. *J Appl Physiol* (1985), 85(2), 478-483.
- Brzycki, M. (1993). Strength testing - Predicting a one-rep max from a reps-to-fatigue. *Journal of Physical Education, Recreation and Dance*, 64(1), 88-90.
- Buckthorpe, M., Erskine, R. M., Fletcher, G., & Folland, J. P. (2015). Task-specific neural adaptations to isoinertial resistance training. *Scand J Med Sci Sports*, 25(5), 640-649.
- Buitrago, S., Wirtz, N., Flenker, U., & Kleinoder, H. (2014). Physiological and metabolic responses as function of the mechanical load in resistance exercise. *Appl Physiol Nutr Metab*, 39(3), 345-350.
- Buitrago, S., Wirtz, N., Yue, Z., Kleinoder, H., & Mester, J. (2012). Effects of load and training modes on physiological and metabolic responses in resistance exercise. *Eur J Appl Physiol*, 112(7), 2739-2748.
- Byrne, C., & Eston, R. (2002a). The effect of exercise-induced muscle damage on isometric and dynamic knee extensor strength and vertical jump performance. *J Sports Sci*, 20(5), 417-425.
- Byrne, C., & Eston, R. (2002b). Maximal-intensity isometric and dynamic exercise performance after eccentric muscle actions. *J Sports Sci*, 20(12), 951-959.
- Byrne, C., Eston, R. G., & Edwards, R. H. (2001). Characteristics of isometric and dynamic strength loss following eccentric exercise-induced muscle damage. *Scand J Med Sci Sports*, 11(3), 134-140.
- Byrne, C., Twist, C., & Eston, R. (2004). Neuromuscular function after exercise-induced muscle damage: theoretical and applied implications. *Sports Med*, 34(1), 49-69.

- Cady, E. B., Jones, D. A., Lynn, J., & Newham, D. J. (1989). Changes in force and intracellular metabolites during fatigue of human skeletal muscle. *J Physiol*, 418, 311-325.
- Caetano, F. G., de Oliveira, M. J., Marche, A. L., Nakamura, F. Y., Cunha, S. A., & Moura, F. A. (2015). Characterization of the Sprint and Repeated-Sprint Sequences Performed by Professional Futsal Players, According to Playing Position, During Official Matches. *J Appl Biomech*, 31(6), 423-429.
- Cairns, S. P. (2006). Lactic acid and exercise performance: culprit or friend? *Sports Med*, 36(4), 279-291.
- Cairns, S. P., Knicker, A. J., Thompson, M. W., & Sjogaard, G. (2005). Evaluation of models used to study neuromuscular fatigue. *Exerc Sport Sci Rev*, 33(1), 9-16.
- Cairns, S. P., & Lindinger, M. I. (2008). Do multiple ionic interactions contribute to skeletal muscle fatigue? *J Physiol*, 586(17), 4039-4054.
- Campos, G. E., Luecke, T. J., Wendeln, H. K., Toma, K., Hagerman, F. C., Murray, T. F., Ragg, K. E., Ratamess, N. A., Kraemer, W. J., & Staron, R. S. (2002). Muscular adaptations in response to three different resistance-training regimens: specificity of repetition maximum training zones. *Eur J Appl Physiol*, 88(1-2), 50-60.
- Canal, M. R. (2010). Comparison of wavelet and short time Fourier transform methods in the analysis of EMG signals. *J Med Syst*, 34(1), 91-94.
- Cannon, J., Kay, D., Tarpenning, K. M., & Marino, F. E. (2007). Comparative effects of resistance training on peak isometric torque, muscle hypertrophy, voluntary activation and surface EMG between young and elderly women. *Clin Physiol Funct Imaging*, 27(2), 91-100.
- Caremani, M., Dantzig, J., Goldman, Y. E., Lombardi, V., & Linari, M. (2008). Effect of inorganic phosphate on the force and number of myosin cross-bridges during the isometric contraction of permeabilized muscle fibers from rabbit psoas. *Biophys J*, 95(12), 5798-5808.
- Carpinelli, R. N. (2002). Berger in retrospect: effect of varied weight training programmes on strength. *Br J Sports Med*, 36(5), 319-324.
- Carpinelli, R. N. (2004). Science versus opinion. *Br J Sports Med*, 38(2), 240-242.

- Carpinelli, R. N. (2008). The size principle and a critical analysis of the unsubstantiated heavier-is-better recommendation for resistance training. *J Exerc Sci Fit*, 6(2), 67-86.
- Carpinelli, R. N., & Otto, R. M. (1998). Strength training. Single versus multiple sets. *Sports Med*, 26(2), 73-84.
- Carpinelli, R. N., Otto, R. M., & Winett, R. A. (2004). A critical analysis of the ACSM position stand on resistance training: insufficient evidence to support recommended training protocols. *J Exerc Physiol online*, 7(3), 1-60.
- Carranza-Garcia, L. E., George, K., Serrano-Ostariz, E., Casado-Arroyo, R., Caballero-Navarro, A. L., & Legaz-Arrese, A. (2011). Cardiac biomarker response to intermittent exercise bouts. *Int J Sports Med*, 32(5), 327-331.
- Clarke, D. H. (1973). Adaptations in strength and muscular endurance resulting from exercise. *Exerc Sport Sci Rev*, 1, 73-102.
- Coffey, V. G., & Hawley, J. A. (2007). The molecular bases of training adaptation. *Sports Med*, 37(9), 737-763.
- Colson, S., Pousson, M., Martin, A., & Van Hoecke, J. (1999). Isokinetic elbow flexion and coactivation following eccentric training. *J Electromyogr Kinesiol*, 9(1), 13-20.
- Collinson, P. O., Boa, F. G., & Gaze, D. C. (2001). Measurement of cardiac troponins. *Ann Clin Biochem*, 38(Pt 5), 423-449.
- Conceicao, F., Fernandes, J., Lewis, M., González-Badillo, J. J., & Jimenez-Reyes, P. (2015). Movement velocity as a measure of exercise intensity in three lower limb exercises. *J Sports Sci*, 1-8.
- Cormack, S. J., Newton, R. U., McGuigan, M. R., & Doyle, T. L. (2008). Reliability of measures obtained during single and repeated countermovement jumps. *Int J Sports Physiol Perform*, 3(2), 131-144.
- Cormie, P., McCaulley, G. O., Triplett, N. T., & McBride, J. M. (2007). Optimal loading for maximal power output during lower-body resistance exercises. *Med Sci Sports Exerc*, 39(2), 340-349.

- Costill, D. L., Thomas, R., Robergs, R. A., Pascoe, D., Lambert, C., Barr, S., & Fink, W. J. (1991). Adaptations to swimming training: influence of training volume. *Med Sci Sports Exerc*, 23(3), 371-377.
- Cotterman, M. L., Darby, L. A., & Skelly, W. A. (2005). Comparison of muscle force production using the Smith machine and free weights for bench press and squat exercises. *J Strength Cond Res*, 19(1), 169-176.
- Crewther, B., Cronin, J., & Keogh, J. (2005). Possible stimuli for strength and power adaptation: acute mechanical responses. *Sports Med*, 35(11), 967-989.
- Crewther, B., Keogh, J., Cronin, J., & Cook, C. (2006). Possible stimuli for strength and power adaptation: acute hormonal responses. *Sports Med*, 36(3), 215-238.
- Cronin, J. B., McNair, P. J., & Marshall, R. N. (2001). Developing explosive power: a comparison of technique and training. *J Sci Med Sport*, 4(1), 59-70.
- Cronin, J. B., McNair, P. J., & Marshall, R. N. (2002). Is velocity-specific strength training important in improving functional performance? *J Sports Med Phys Fitness*, 42(3), 267-273.
- Cronin, J. B., McNair, P. J., & Marshall, R. N. (2003). Force-velocity analysis of strength-training techniques and load: implications for training strategy and research. *J Strength Cond Res*, 17(1), 148-155.
- Cruickshank, T. M., Reyes, A. R., & Ziman, M. R. (2015). A systematic review and meta-analysis of strength training in individuals with multiple sclerosis or Parkinson disease. *Medicine (Baltimore)*, 94(4), e411.
- Currell, K., & Jeukendrup, A. E. (2008). Validity, reliability and sensitivity of measures of sporting performance. *Sports Med*, 38(4), 297-316.
- Chapelle, J. P. (1999). Cardiac troponin I and troponin T: recent players in the field of myocardial markers. *Clin Chem Lab Med*, 37(1), 11-20.
- Chapman, D., Newton, M., Sacco, P., & Nosaka, K. (2006). Greater muscle damage induced by fast versus slow velocity eccentric exercise. *Int J Sports Med*, 27(8), 591-598.
- Chelly, M. S., Fathloun, M., Cherif, N., Ben Amar, M., Tabka, Z., & Van Praagh, E. (2009). Effects of a back squat training program on leg power, jump, and sprint performances in junior soccer players. *J Strength Cond Res*, 23(8), 2241-2249.

- Cheng, A. J., & Rice, C. L. (2005). Fatigue and recovery of power and isometric torque following isotonic knee extensions. *J Appl Physiol*, 99(4), 1446-1452.
- Cheng, A. J., & Rice, C. L. (2009). Isometric torque and shortening velocity following fatigue and recovery of different voluntary tasks in the dorsiflexors. *Appl Physiol Nutr Metab*, 34(5), 866-874.
- Chesler, N. C., & Durfee, W. K. (1997). Surface EMG as a fatigue indicator during FES-induced isometric muscle contractions. *J Electromyogr Kinesiol*, 7(1), 27-37.
- Chestnut, J. L., & Docherty, D. (1999). The effects of 4 and 10 repetition maximum weight-training protocols on neuromuscular adaptations in untrained men. *J Strength Cond Res*, 13, 353-359.
- Chiu, L. Z., Fry, A. C., Schilling, B. K., Johnson, E. J., & Weiss, L. W. (2004). Neuromuscular fatigue and potentiation following two successive high intensity resistance exercise sessions. *Eur J Appl Physiol*, 92(4-5), 385-392.
- Chiu, L. Z., & Salem, G. J. (2010). Time series analysis: evaluating performance trends within resistance exercise sessions. *J Strength Cond Res*, 24(1), 230-234.
- Chowdhury, S. K., & Nimbarte, A. D. (2015). Comparison of Fourier and wavelet analysis for fatigue assessment during repetitive dynamic exertion. *J Electromyogr Kinesiol*, 25(2), 205-213.
- Chowdhury, S. K., Nimbarte, A. D., Jaridi, M., & Creese, R. C. (2013). Discrete wavelet transform analysis of surface electromyography for the fatigue assessment of neck and shoulder muscles. *J Electromyogr Kinesiol*, 23(5), 995-1003.
- Darcus, H. D., & Salter, N. (1955). The effect of repeated muscular exertion on muscle strength. *J Physiol*, 129(2), 325-336.
- Davidson, P. K., Gallagher, I. J., Hartman, J. W., Tarnopolsky, M. A., Dela, F., Helge, J. W., Timmons, J. A., & Phillips, S. M. (2011). High responders to resistance exercise training demonstrate differential regulation of skeletal muscle microRNA expression. *J Appl Physiol (1985)*, 110(2), 309-317.
- Davies, T., Orr, R., Halaki, M., & Hackett, D. (2016). Effect of training leading to repetition failure on muscular strength: A systematic review and meta-analysis. *Sports Med*, 46(4), 487-502.

- de Haan, A., Jones, D. A., & Sargeant, A. J. (1989). Changes in velocity of shortening, power output and relaxation rate during fatigue of rat medial gastrocnemius muscle. *Pflugers Arch*, 413(4), 422-428.
- de Haan, A., Lodder, M. A., & Sargeant, A. J. (1989). Age-related effects of fatigue and recovery from fatigue in rat medial gastrocnemius muscle. *Q J Exp Physiol*, 74(5), 715-726.
- de Oliveira, F. B., Rizzato, G. F., & Denadai, B. S. (2013). Are early and late rate of force development differently influenced by fast-velocity resistance training? *Clin Physiol Funct Imaging*, 33(4), 282-287.
- de Salles, B. F., Simao, R., Miranda, F., Novaes Jda, S., Lemos, A., & Willardson, J. M. (2009). Rest interval between sets in strength training. *Sports Med*, 39(9), 765-777.
- de Salles, B. F., Simao, R., Miranda, H., Bottaro, M., Fontana, F., & Willardson, J. M. (2010). Strength increases in upper and lower body are larger with longer inter-set rest intervals in trained men. *J Sci Med Sport*, 13(4), 429-433.
- Del Balso, C., & Cafarelli, E. (2007). Adaptations in the activation of human skeletal muscle induced by short-term isometric resistance training. *J Appl Physiol*, 103(1), 402-411.
- Delorme, T. L. (1945). Restoration of muscle power by heavy-resistance exercises. *J Bone Joint Surg Am*, 27, 645-667.
- Denham, J., Marques, F. Z., Bruns, E. L., O'Brien, B. J., & Charchar, F. J. (2016). Epigenetic changes in leukocytes after 8 weeks of resistance exercise training. *Eur J Appl Physiol*, 116(6), 1245-1253.
- Denton, J., & Cronin, J. B. (2006). Kinematic, kinetic, and blood lactate profiles of continuous and intraset rest loading schemes. *J Strength Cond Res*, 20(3), 528-534.
- Desmedt, J. E., & Godaux, E. (1977). Ballistic contractions in man: characteristic recruitment pattern of single motor units of the tibialis anterior muscle. *J Physiol*, 264(3), 673-693.
- Desmedt, J. E., & Godaux, E. (1978). Ballistic contractions in fast or slow human muscles: discharge patterns of single motor units. *J Physiol*, 285, 185-196.

- Di Giulio, C., Daniele, F., & Tipton, C. M. (2006). Angelo Mosso and muscular fatigue: 116 years after the first Congress of Physiologists: IUPS commemoration. *Adv Physiol Educ*, 30(2), 51-57.
- Dias, I., de Salles, B. F., Novaes, J., Costa, P. B., & Simao, R. (2010). Influence of exercise order on maximum strength in untrained young men. *J Sci Med Sport*, 13(1), 65-69.
- Dimitrov, G. V., Arabadzhiev, T. I., Hogrel, J. Y., & Dimitrova, N. A. (2008). Simulation analysis of interference EMG during fatiguing voluntary contractions. Part II--changes in amplitude and spectral characteristics. *J Electromyogr Kinesiol*, 18(1), 35-43.
- Dimitrov, G. V., Arabadzhiev, T. I., Mileva, K. N., Bowtell, J. L., Crichton, N., & Dimitrova, N. A. (2006). Muscle fatigue during dynamic contractions assessed by new spectral indices. *Med Sci Sports Exerc*, 38(11), 1971-1979.
- Dimitrova, N. A., Hogrel, J. Y., Arabadzhiev, T. I., & Dimitrov, G. V. (2005). Estimate of M-wave changes in human biceps brachii during continuous stimulation. *J Electromyogr Kinesiol*, 15(4), 341-348.
- Douris, P. C., White, B. P., Cullen, R. R., Keltz, W. E., Meli, J., Mondiello, D. M., & Wenger, D. (2006). The relationship between maximal repetition performance and muscle fiber type as estimated by noninvasive technique in the quadriceps of untrained women. *J Strength Cond Res*, 20(3), 699-703.
- Drinkwater, E. J., Lawton, T. W., Lindsell, R. P., Pyne, D. B., Hunt, P. H., & McKenna, M. J. (2005). Training leading to repetition failure enhances bench press strength gains in elite junior athletes. *J Strength Cond Res*, 19(2), 382-388.
- Drinkwater, E. J., Lawton, T. W., McKenna, M. J., Lindsell, R. P., Hunt, P. H., & Pyne, D. B. (2007). Increased number of forced repetitions does not enhance strength development with resistance training. *J Strength Cond Res*, 21(3), 841-847.
- Duchateau, J., Balestra, C., Carpentier, A., & Hainaut, K. (2002). Reflex regulation during sustained and intermittent submaximal contractions in humans. *J Physiol*, 541(Pt 3), 959-967.
- Duffey, M. J., & Challis, J. H. (2007). Fatigue effects on bar kinematics during the bench press. *J Strength Cond Res*, 21(2), 556-560.



- Edman, K. A., & Mattiazzi, A. R. (1981). Effects of fatigue and altered pH on isometric force and velocity of shortening at zero load in frog muscle fibres. *J Muscle Res Cell Motil*, 2(3), 321-334.
- Edwards, R. H. T. (1983). Biochemical basis of fatigue in exercise performance. In: *Biochemistry of Exercise, edited by Knuttgen HG. Champaign, IL: Human Kinetics, p. 3–28.*
- Eijnde, B. O., Lebacq, J., Ramaekers, M., & Hespel, P. (2004). Effect of muscle creatine content manipulation on contractile properties in mouse muscles. *Muscle Nerve*, 29(3), 428-435.
- Enoka, R. M., Baudry, S., Rudroff, T., Farina, D., Klass, M., & Duchateau, J. (2011). Unraveling the neurophysiology of muscle fatigue. *J Electromyogr Kinesiol*, 21(2), 208-219.
- Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2008). Muscle fatigue: what, why and how it influences muscle function. *J Physiol*, 586(1), 11-23.
- Esbjornsson-Liljedahl, M., Sundberg, C. J., Norman, B., & Jansson, E. (1999). Metabolic response in type I and type II muscle fibers during a 30-s cycle sprint in men and women. *J Appl Physiol (1985)*, 87(4), 1326-1332.
- Faude, O., Koch, T., & Meyer, T. (2012). Straight sprinting is the most frequent action in goal situations in professional football. *J Sports Sci*, 30(7), 625-631.
- Ferri, A., Narici, M., Grassi, B., & Pousson, M. (2006). Neuromuscular recovery after a strength training session in elderly people. *Eur J Appl Physiol*, 97(3), 272-279.
- Ferri, A., Scaglioni, G., Pousson, M., Capodaglio, P., Van Hoecke, J., & Narici, M. V. (2003). Strength and power changes of the human plantar flexors and knee extensors in response to resistance training in old age. *Acta Physiol Scand*, 177(1), 69-78.
- Fielding, R. A., LeBrasseur, N. K., Cuoco, A., Bean, J., Mizer, K., & Fiatarone Singh, M. A. (2002). High-velocity resistance training increases skeletal muscle peak power in older women. *J Am Geriatr Soc*, 50(4), 655-662.
- Fink, J., Kikuchi, N., & Nakazato, K. (2016). Effects of rest intervals and training loads on metabolic stress and muscle hypertrophy. *Clin Physiol Funct Imaging*.

- Fisher, J., Steele, J., Bruce-Low, S., & Smith, D. (2011). Evidence-based resistance training recommendations. *Med Sport*, 15(3), 147-162.
- Fitts, R. H. (2008). The cross-bridge cycle and skeletal muscle fatigue. *J Appl Physiol* (1985), 104(2), 551-558.
- Fleck, S. J., & Kraemer, W. J. (1988). Resistance Training: Basic Principles (Part 1 of 4). *Phys Sportsmed*, 16(3), 160-171.
- Fluck, M., & Hoppeler, H. (2003). Molecular basis of skeletal muscle plasticity--from gene to form and function. *Rev Physiol Biochem Pharmacol*, 146, 159-216.
- Folland, J. P., Irish, C. S., Roberts, J. C., Tarr, J. E., & Jones, D. A. (2002). Fatigue is not a necessary stimulus for strength gains during resistance training. *Br J Sports Med*, 36(5), 370-373; discussion 374.
- Folland, J. P., & Williams, A. G. (2007). The adaptations to strength training : morphological and neurological contributions to increased strength. *Sports Med*, 37(2), 145-168.
- Franco-Márquez, F., Rodríguez-Rosell, D., González-Suarez, J. M., Pareja-Blanco, F., Mora-Custodio, R., Yanez-Garcia, J. M., & González-Badillo, J. J. (2015). Effects of combined resistance training and plyometrics on physical performance in young soccer players. *Int J Sports Med*, 36(11), 906-914.
- Fry, A. C. (2004). The role of resistance exercise intensity on muscle fibre adaptations. *Sports Med*, 34(10), 663-679.
- Fry, A. C., & Kraemer, W. J. (1997). Resistance exercise overtraining and overreaching. Neuroendocrine responses. *Sports Med*, 23(2), 106-129.
- Fry, A. C., Kraemer, W. J., Stone, M. H., Warren, B. J., Kearney, J. T., Maresh, C. M., Weseman, C. A., & Fleck, S. J. (1993). Endocrine and performance responses to high volume training and amino acid supplementation in elite junior weightlifters. *Int J Sports Nutr*, 3, 306-322.
- Gandevia, S. C., Petersen, N., Butler, J. E., & Taylor, J. L. (1999). Impaired response of human motoneurons to corticospinal stimulation after voluntary exercise. *J Physiol*, 521 Pt 3, 749-759.
- Garcia-Lopez, D., de Paz, J. A., Moneo, E., Jimenez-Jimenez, R., Bresciani, G., & Izquierdo, M. (2007). Effects of short vs. long rest period between sets on elbow-

- flexor muscular endurance during resistance training to failure. *J Strength Cond Res*, 21(4), 1320-1324.
- Garcia-Ramos, A., Padial, P., Haff, G. G., Arguelles-Cienfuegos, J., Garcia-Ramos, M., Conde-Pipo, J., & Feriche, B. (2015). Effect of different interrepetition rest periods on barbell velocity loss during the ballistic bench press exercise. *J Strength Cond Res*, 29(9), 2388-2396.
- Garhammer, J. (1991). A comparison of maximal power outputs between elite male and female weightlifters in competition. *Int J Sport Biomech*, 7, 3-11.
- Gelen, E. (2010). Acute effects of different warm-up methods on sprint, slalom dribbling, and penalty kick performance in soccer players. *J Strength Cond Res*, 24(4), 950-956.
- Gentil, P., Oliveira, E., de Araujo Rocha Junior, V., do Carmo, J., & Bottaro, M. (2007). Effects of exercise order on upper-body muscle activation and exercise performance. *J Strength Cond Res*, 21(4), 1082-1086.
- Gentil, P., Oliveira, E., Fontana, K. E., Molina, G. E., de Oliveira, R. J., & Bottaro, M. (2006). The acute effects of varied resistance training methods on blood lactate and loading characteristics in recreationally trained men. *Rev Bras Med Esporte* 12, 272e-275e.
- Gerdle, B., Karlsson, S., Crenshaw, A. G., Elert, J., & Friden, J. (2000). The influences of muscle fibre proportions and areas upon EMG during maximal dynamic knee extensions. *Eur J Appl Physiol*, 81(1-2), 2-10.
- Gerdle, B., Larsson, B., & Karlsson, S. (2000). Criterion validation of surface EMG variables as fatigue indicators using peak torque: a study of repetitive maximum isokinetic knee extensions. *J Electromyogr Kinesiol*, 10(4), 225-232.
- Girman, J. C., Jones, M. T., Matthews, T. D., & Wood, R. J. (2014). Acute effects of a cluster-set protocol on hormonal, metabolic and performance measures in resistance-trained males. *Eur J Sport Sci*, 14(2), 151-159.
- González-Badillo, J. J. (1991). Halterofilia. Ed. Comité Olímpico Español.
- González-Badillo, J. J., Gorostiaga, E. M., Arellano, R., & Izquierdo, M. (2005). Moderate resistance training volume produces more favorable strength gains than

- high or low volumes during a short-term training cycle. *J Strength Cond Res*, 19(3), 689-697.
- González-Badillo, J. J., Izquierdo, M., & Gorostiaga, E. M. (2006). Moderate volume of high relative training intensity produces greater strength gains compared with low and high volumes in competitive weightlifters. *J Strength Cond Res*, 20(1), 73-81.
- González-Badillo, J. J., Marques, M. C., & Sánchez-Medina, L. (2011). The importance of movement velocity as a measure to control resistance training intensity. *J Hum Kinet*, 29A, 15-19.
- González-Badillo, J. J., & Ribas, J. (2002). Bases de la programación del entrenamiento de fuerza. *INDE publicaciones. Barcelona (España)*.
- González-Badillo, J. J., Rodríguez-Rosell, D., Sánchez-Medina, L., Gorostiaga, E. M., & Pareja-Blanco, F. (2014). Maximal intended velocity training induces greater gains in bench press performance than deliberately slower half-velocity training. *Eur J Sport Sci*, 1-10.
- González-Badillo, J. J., Rodríguez-Rosell, D., Sánchez-Medina, L., Ribas, J., Lopez-Lopez, C., Mora-Custodio, R., Yanez-Garcia, J. M., & Pareja-Blanco, F. (2016). Short-term recovery following resistance exercise leading or not to failure. *Int J Sports Med*, 37(4), 295-304.
- González-Badillo, J. J., & Sánchez-Medina, L. (2010). Movement velocity as a measure of loading intensity in resistance training. *Int J Sports Med*, 31(5), 347-352.
- González-Badillo, J. J. (1992). Metodología del entrenamiento para el desarrollo de la fuerza. Madrid. Comité Olímpico Español (COES).
- González-Badillo, J. J., & Gorostiaga, E. M. (1995). Fundamentos del entrenamiento de la fuerza. Aplicación al alto rendimiento deportivo. *INDE publicaciones. Barcelona (España)*.
- González-Izal, M., Malanda, A., Gorostiaga, E., & Izquierdo, M. (2012). Electromyographic models to assess muscle fatigue. *J Electromyogr Kinesiol*, 22(4), 501-512.
- González-Izal, M., Malanda, A., Navarro-Amezqueta, I., Gorostiaga, E. M., Mallor, F., Ibanez, J., & Izquierdo, M. (2010a). EMG spectral indices and muscle power fatigue during dynamic contractions. *J Electromyogr Kinesiol*, 20(2), 233-240.

- González-Izal, M., Rodríguez-Carreno, I., Malanda, A., Mallor-Gimenez, F., Navarro-Amezqueta, I., Gorostiaga, E. M., & Izquierdo, M. (2010b). sEMG wavelet-based indices predicts muscle power loss during dynamic contractions. *J Electromyogr Kinesiol*, 20(6), 1097-1106.
- Gorostiaga, E. M., Navarro-Amezqueta, I., Calbet, J. A., Hellsten, Y., Cusso, R., Guerrero, M., Granados, C., González-Izal, M., Ibanez, J., & Izquierdo, M. (2012a). Energy metabolism during repeated sets of leg press exercise leading to failure or not. *PLoS One*, 7(7), e40621.
- Gorostiaga, E. M., Navarro-Amezqueta, I., Calbet, J. A., Sánchez-Medina, L., Cusso, R., Guerrero, M., Granados, C., González-Izal, M., Ibanez, J., & Izquierdo, M. (2014). Blood ammonia and lactate as markers of muscle metabolites during leg press exercise. *J Strength Cond Res*, 28(10), 2775-2785.
- Gorostiaga, E. M., Navarro-Amezqueta, I., Cusso, R., Hellsten, Y., Calbet, J. A., Guerrero, M., Granados, C., González-Izal, M., Ibanez, J., & Izquierdo, M. (2010). Anaerobic energy expenditure and mechanical efficiency during exhaustive leg press exercise. *PLoS One*, 5(10), e13486.
- Gorostiaga, E. M., Navarro-Amezqueta, I., González-Izal, M., Malanda, A., Granados, C., Ibanez, J., Setuain, I., & Izquierdo, M. (2012b). Blood lactate and sEMG at different knee angles during fatiguing leg press exercise. *Eur J Appl Physiol*, 112(4), 1349-1358.
- Granacher, U., Lesinski, M., Busch, D., Muehlbauer, T., Prieske, O., Puta, C., Gollhofer, A., & Behm, D. G. (2016). Effects of resistance training in youth athletes on muscular fitness and athletic performance: a conceptual model for long-term athlete development. *Front Physiol*, 7, 164.
- Griffin, L., & Cafarelli, E. (2005). Resistance training: cortical, spinal, and motor unit adaptations. *Can J Appl Physiol*, 30(3), 328-340.
- Grimby, L., & Hannerz, J. (1977). Firing rate and recruitment order of toe extensor motor units in different modes of voluntary contraction. *J Physiol*, 264(3), 865-879.
- Gruber, M., & Gollhofer, A. (2004). Impact of sensorimotor training on the rate of force development and neural activation. *Eur J Appl Physiol*, 92(1-2), 98-105.

- Hackney, A. C., Davis, H. C., & Lane, A. R. (2016). Growth hormone-insulin-like growth factor axis, thyroid axis, prolactin, and exercise. *Front Horm Res*, 47, 1-11.
- Hackney, A. C., Sharp, R. L., Runyan, W. S., & Ness, R. J. (1989). Relationship of resting prolactin and testosterone in males during intensive training. *Br J Sports Med*, 23(3), 194.
- Haff, G. G., Whitley, A., McCoy, L. B., O'Bryant, H. S., Kilgore, J. L., Haff, E. E., Pierce, K., & Stone, M. H. (2003). Effects of different set configurations on barbell velocity and displacement during a clean pull. *J Strength Cond Res*, 17(1), 95-103.
- Hakkinen, K. (1993). Neuromuscular fatigue and recovery in male and female athletes during heavy resistance exercise. *Int J Sports Med*, 14(2), 53-59.
- Hakkinen, K. (1995). Neuromuscular fatigue and recovery in women at different ages during heavy resistance loading. *Electromyogr Clin Neurophysiol*, 35(7), 403-413.
- Hakkinen, K., Kallinen, M., Izquierdo, M., Jokelainen, K., Lassila, H., Malkia, E., Kraemer, W. J., Newton, R. U., & Alen, M. (1998). Changes in agonist-antagonist EMG, muscle CSA, and force during strength training in middle-aged and older people. *J Appl Physiol* (1985), 84(4), 1341-1349.
- Hakkinen, K., & Komi, P. V. (1983). Electromyographic changes during strength training and detraining. *Med Sci Sports Exerc*, 15(6), 455-460.
- Hakkinen, K., Komi, P. V., Alen, M., & Kauhanen, H. (1987). EMG, muscle fibre and force production characteristics during a 1 year training period in elite weightlifters. *Eur J Appl Physiol*, 56(4), 419-427.
- Hakkinen, K., Kraemer, W. J., Newton, R. U., & Alen, M. (2001). Changes in electromyographic activity, muscle fibre and force production characteristics during heavy resistance/power strength training in middle-aged and older men and women. *Acta Physiol Scand*, 171(1), 51-62.
- Hakkinen, K., & Pakarinen, A. (1991). Serum hormones in male strength athletes during intensive short term strength training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 63(3-4), 194-199.

- Hakkinen, K., Pakarinen, A., Alen, M., Kauhanen, H., & Komi, P. V. (1987). Relationships between training volume, physical performance capacity, and serum hormone concentrations during prolonged training in elite weight lifters. *Int J Sports Med*, 8 Suppl 1, 61-65.
- Hakkinen, K., Pakarinen, A., Alen, M., Kauhanen, H., & Komi, P. V. (1988). Neuromuscular and hormonal adaptations in athletes to strength training in two years. *J Appl Physiol* (1985), 65(6), 2406-2412.
- Hakkinen, K., Pakarinen, A., Alen, M., & Komi, P. V. (1985). Serum hormones during prolonged training of neuromuscular performance. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 53(4), 287-293.
- Hakkinen, K., Pakarinen, A., Kraemer, W. J., Hakkinen, A., Valkeinen, H., & Alen, M. (2001). Selective muscle hypertrophy, changes in EMG and force, and serum hormones during strength training in older women. *J Appl Physiol* (1985), 91(2), 569-580.
- Halson, S. L. (2014). Monitoring training load to understand fatigue in athletes. *Sports Med*, 44 Suppl 2, S139-147.
- Hamada, T., Sale, D. G., MacDougall, J. D., & Tarnopolsky, M. A. (2003). Interaction of fibre type, potentiation and fatigue in human knee extensor muscles. *Acta Physiol Scand*, 178(2), 165-173.
- Hansen, K. T., Cronin, J. B., Pickering, S. L., & Newton, M. J. (2011). Does cluster loading enhance lower body power development in preseason preparation of elite rugby union players? *J Strength Cond Res*, 25(8), 2118-2126.
- Hardee, J. P., Triplett, N. T., Utter, A. C., Zwetsloot, K. A., & McBride, J. M. (2012). Effect of interrepetition rest on power output in the power clean. *J Strength Cond Res*, 26(4), 883-889.
- Harridge, S. D. (2007). Plasticity of human skeletal muscle: gene expression to in vivo function. *Exp Physiol*, 92(5), 783-797.
- Harridge, S. D., Bottinelli, R., Canepari, M., Pellegrino, M. A., Reggiani, C., Esbjornsson, M., & Saltin, B. (1996). Whole-muscle and single-fibre contractile properties and myosin heavy chain isoforms in humans. *Pflugers Arch*, 432(5), 913-920.

- Harries, S. K., Lubans, D. R., & Callister, R. (2012). Resistance training to improve power and sports performance in adolescent athletes: a systematic review and meta-analysis. *J Sci Med Sport*, 15(6), 532-540.
- Hass, C. J., Feigenbaum, M. S., & Franklin, B. A. (2001). Prescription of resistance training for healthy populations. *Sports Med*, 31(14), 953-964.
- Henneman, E. (1957). Relation between size of neurons and their susceptibility to discharge. *Science*, 126(3287), 1345-1347.
- Henneman, E., Somjen, G., & Carpenter, D. O. (1965). Functional significance of cell size in spinal motoneurons. *J Neurophysiol*, 28, 560-580.
- Hermassi, S., Chelly, M. S., Tabka, Z., Shephard, R. J., & Chamari, K. (2011). Effects of 8-week in-season upper and lower limb heavy resistance training on the peak power, throwing velocity, and sprint performance of elite male handball players. *J Strength Cond Res*, 25(9), 2424-2433.
- Hermens, H. J., Freriks, B., Disselhorst-Klug, C., & Rau, G. (2000). Development of recommendations for SEMG sensors and sensor placement procedures. *J Electromyogr Kinesiol*, 10(5), 361-374.
- Hickson, R. C., Hidaka, K., Foster, C., Falduto, M. T., & Chatterton, R. T., Jr. (1994). Successive time courses of strength development and steroid hormone responses to heavy-resistance training. *J Appl Physiol* (1985), 76(2), 663-670.
- Hill-Haas, S., Bishop, D., Dawson, B., Goodman, C., & Edge, J. (2007). Effects of rest interval during high-repetition resistance training on strength, aerobic fitness, and repeated-sprint ability. *J Sports Sci*, 25(6), 619-628.
- Hoeger, W. W., Hopkins, D. R., Barette, S. L., & Hale, D. F. (1990). Relationship between repetitions and selected percentages of one repetition maximum: a comparison between untrained and trained males and females. *J Appl Sport Sci Res*, 4, 47-54.
- Hoffman, J. (2002). Physiological aspects of sport training and performance. Champaign, IL: Human Kinetics. 2ª Edición.
- Hoffman, J. R., Im, J., Rundell, K. W., Kang, J., Nioka, S., Spiering, B. A., Kime, R., & Chance, B. (2003). Effect of muscle oxygenation during resistance exercise on anabolic hormone response. *Med Sci Sports Exerc*, 35(11), 1929-1934.



- Holm, L., Reitelseder, S., Pedersen, T. G., Doessing, S., Petersen, S. G., Flyvbjerg, A., Andersen, J. L., Aagaard, P., & Kjaer, M. (2008). Changes in muscle size and MHC composition in response to resistance exercise with heavy and light loading intensity. *J Appl Physiol* (1985), 105(5), 1454-1461.
- Holtermann, A., Roeleveld, K., Vereijken, B., & Ettema, G. (2007). The effect of rate of force development on maximal force production: acute and training-related aspects. *Eur J Appl Physiol*, 99(6), 605-613.
- Hopkins, W. G. (2006). Analysis of a pre-post controlled trial (Excel spreadsheet). [newstats.org/xParallelGroupTrial.xls](http://newstats.org/xParallelGroupTrial.xls) Retrieved 10 February, 2012, from <http://www.sportsci.org>.
- Hopkins, W. G., Marshall, S. W., Batterham, A. M., & Hanin, J. (2009). Progressive statistics for studies in sports medicine and exercise science. *Med Sci Sports Exerc*, 41(1), 3-13.
- Hoppeler, H. (2016). Molecular networks in skeletal muscle plasticity. *J Exp Biol*, 219(Pt 2), 205-213.
- Hostens, I., Seghers, J., Spaepen, A., & Ramon, H. (2004). Validation of the wavelet spectral estimation technique in biceps brachii and brachioradialis fatigue assessment during prolonged low-level static and dynamic contractions. *J Electromyogr Kinesiol*, 14(2), 205-215.
- Houtz, S. J., Parrish, A. M., & Hellebrandt, F. A. (1946). The influence of heavy resistance exercise on strength. *Physiotherap Rev*, 26(6), 299-304.
- Hunter, S. K., Critchlow, A., Shin, I. S., & Enoka, R. M. (2004). Men are more fatigable than strength-matched women when performing intermittent submaximal contractions. *J Appl Physiol* (1985), 96(6), 2125-2132.
- Hutchins, K. (1992). *Super Slow. 2nd ed. Casselberry, FL: Media Support.*
- Iglesias-Soler, E., Carballeira, E., Sánchez-Otero, T., Mayo, X., Jimenez, A., & Chapman, M. L. (2012). Acute effects of distribution of rest between repetitions. *Int J Sports Med*, 33(5), 351-358.
- Iglesias, E., Boullosa, D. A., Dopico, X., & Carballeira, E. (2010). Analysis of factors that influence the maximum number of repetitions in two upper-body resistance exercises: curl biceps and bench press. *J Strength Cond Res*, 24(6), 1566-1572.

- Ingebrigtsen, J., Holtermann, A., & Roeleveld, K. (2009). Effects of load and contraction velocity during three-week biceps curls training on isometric and isokinetic performance. *J Strength Cond Res*, 23(6), 1670-1676.
- Izquierdo-Gabarren, M., González De Txabarri Exposito, R., Garcia-pallares, J., Sánchez-medina, L., De Villarreal, E. S., & Izquierdo, M. (2010). Concurrent endurance and strength training not to failure optimizes performance gains. *Med Sci Sports Exerc*, 42(6), 1191-1199.
- Izquierdo, M., González-Badillo, J. J., Hakkinen, K., Ibanez, J., Kraemer, W. J., Altadill, A., Eslava, J., & Gorostiaga, E. M. (2006a). Effect of loading on unintentional lifting velocity declines during single sets of repetitions to failure during upper and lower extremity muscle actions. *Int J Sports Med*, 27(9), 718-724.
- Izquierdo, M., González-Izal, M., Navarro-Amezqueta, I., Calbet, J. A., Ibanez, J., Malanda, A., Mallor, F., Hakkinen, K., Kraemer, W. J., & Gorostiaga, E. M. (2011). Effects of strength training on muscle fatigue mapping from surface EMG and blood metabolites. *Med Sci Sports Exerc*, 43(2), 303-311.
- Izquierdo, M., Ibanez, J., Calbet, J. A., González-Izal, M., Navarro-Amezqueta, I., Granados, C., Malanda, A., Idoate, F., González-Badillo, J. J., Hakkinen, K., Kraemer, W. J., Tirapu, I., & Gorostiaga, E. M. (2009). Neuromuscular fatigue after resistance training. *Int J Sports Med*, 30(8), 614-623.
- Izquierdo, M., Ibanez, J., González-Badillo, J. J., Hakkinen, K., Ratamess, N. A., Kraemer, W. J., French, D. N., Eslava, J., Altadill, A., Asiain, X., & Gorostiaga, E. M. (2006b). Differential effects of strength training leading to failure versus not to failure on hormonal responses, strength, and muscle power gains. *J Appl Physiol*, 100(5), 1647-1656.
- Jenkins, N. D., Housh, T. J., Bergstrom, H. C., Cochrane, K. C., Hill, E. C., Smith, C. M., Johnson, G. O., Schmidt, R. J., & Cramer, J. T. (2015). Muscle activation during three sets to failure at 80 vs. 30% 1RM resistance exercise. *Eur J Appl Physiol*, 115(11), 2335-2347.
- Jenkins, N. D., Housh, T. J., Buckner, S. L., Bergstrom, H. C., Cochrane, K. C., Hill, E. C., Smith, C. M., Schmidt, R. J., Johnson, G. O., & Cramer, J. T. (2016).

- Neuromuscular adaptations after 2 and 4 weeks of 80% versus 30% 1 Repetition Maximum resistance training to failure. *J Strength Cond Res*, 30(8), 2174-2185.
- Jenkins, N. D., Housh, T. J., Traylor, D. A., Cochrane, K. C., Bergstrom, H. C., Lewis, R. W., Schmidt, R. J., Johnson, G. O., & Cramer, J. T. (2014). The rate of torque development: a unique, non-invasive indicator of eccentric-induced muscle damage? *Int J Sports Med*, 35(14), 1190-1195.
- Jones, D. A. (2010). Changes in the force-velocity relationship of fatigued muscle: implications for power production and possible causes. *J Physiol*, 588(Pt 16), 2977-2986.
- Jones, D. A., & Rutherford, O. M. (1987). Human muscle strength training: the effects of three different regimens and the nature of the resultant changes. *J Physiol*, 391, 1-11.
- Joseph, M. F., & Denegar, C. R. (2015). Treating tendinopathy: perspective on anti-inflammatory intervention and therapeutic exercise. *Clin Sports Med*, 34(2), 363-374.
- Juel, C. (1997). Lactate-proton cotransport in skeletal muscle. *Physiol Rev*, 77(2), 321-358.
- Jurado-Lavanant, A., Alvero-Cruz, J. R., Pareja-Blanco, F., Melero-Romero, C., Rodríguez-Rosell, D., & Fernandez-Garcia, J. C. (2015). The effects of aquatic plyometric training on repeated jumps, drop jumps and muscle damage. *Int J Sports Med*.
- Kandel, E. (2001). Principios de Neurociencia. Ed. McGraw-Hill / Interamericana de España, S.A.
- Kanehisa, H., & Miyashita, M. (1983). Specificity of velocity in strength training. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 52(1), 104-106.
- Kawamori, N., Crum, A. J., Blumert, P. A., Kulik, J. R., Childers, J. T., Wood, J. A., Stone, M. H., & Haff, G. G. (2005). Influence of different relative intensities on power output during the hang power clean: identification of the optimal load. *J Strength Cond Res*, 19(3), 698-708.
- Kawamori, N., Rossi, S. J., Justice, B. D., Haff, E. E., Pistilli, E. E., O'Bryant, H. S., Stone, M. H., & Haff, G. G. (2006). Peak force and rate of force development

- during isometric and dynamic mid-thigh clean pulls performed at various intensities. *J Strength Cond Res*, 20(3), 483-491.
- Keen, D. A., Yue, G. H., & Enoka, R. M. (1994). Training-related enhancement in the control of motor output in elderly humans. *J Appl Physiol* (1985), 77(6), 2648-2658.
- Kesar, T., & Binder-Macleod, S. (2006). Effect of frequency and pulse duration on human muscle fatigue during repetitive electrical stimulation. *Exp Physiol*, 91(6), 967-976.
- Kilduff, L. P., Bevan, H., Owen, N., Kingsley, M. I., Bunce, P., Bennett, M., & Cunningham, D. (2007). Optimal loading for peak power output during the hang power clean in professional rugby players. *Int J Sports Physiol Perform*, 2(3), 260-269.
- Klass, M., Guissard, N., & Duchateau, J. (2004). Limiting mechanisms of force production after repetitive dynamic contractions in human triceps surae. *J Appl Physiol* (1985), 96(4), 1516-1521; discussion.
- Klass, M., Levenez, M., Enoka, R. M., & Duchateau, J. (2008). Spinal mechanisms contribute to differences in the time to failure of submaximal fatiguing contractions performed with different loads. *J Neurophysiol*, 99(3), 1096-1104.
- Komi, P. V., & Tesch, P. (1979). EMG frequency spectrum, muscle structure, and fatigue during dynamic contractions in man. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 42(1), 41-50.
- Korhonen, M. T., Cristea, A., Alen, M., Hakkinen, K., Sipila, S., Mero, A., Viitasalo, J. T., Larsson, L., & Suominen, H. (2006). Aging, muscle fiber type, and contractile function in sprint-trained athletes. *J Appl Physiol*, 101(3), 906-917.
- Kotzamanidis, C., Chatzopoulos, D., Michailidis, C., Papaioakovou, G., & Patikas, D. (2005). The effect of a combined high-intensity strength and speed training program on the running and jumping ability of soccer players. *J Strength Cond Res*, 19(2), 369-375.
- Koziris, L. P., Hickson, R. C., Chatterton, R. T., Jr., Groeth, R. T., Christie, J. M., Goldflies, D. G., & Unterman, T. G. (1999). Serum levels of total and free IGF-I

- and IGFBP-3 are increased and maintained in long-term training. *J Appl Physiol* (1985), 86(4), 1436-1442.
- Kraemer, W. J. (1988). Endocrine responses to resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 20(5 Suppl), S152-157.
- Kraemer, W. J., Adams, K., Cafarelli, E., Dudley, G. A., Dooly, C., Feigenbaum, M. S., Fleck, S. J., Franklin, B., Fry, A. C., Hoffman, J. R., Newton, R. U., Pottenger, J., Stone, M. H., Ratamess, N. A., & Triplett-McBride, T. (2002). American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc*, 34(2), 364-380.
- Kraemer, W. J., Dziados, J. E., Marchitelli, L. J., Gordon, S. E., Harman, E. A., Mello, R., Fleck, S. J., Frykman, P. N., & Triplett, N. T. (1993a). Effects of different heavy-resistance exercise protocols on plasma beta-endorphin concentrations. *J Appl Physiol* (1985), 74(1), 450-459.
- Kraemer, W. J., & Fleck, S. J. (1988). Resistance training: exercise prescription (Part 4 of 4). *Phys Sportsmed*, 16(6), 69-81.
- Kraemer, W. J., Fleck, S. J., & Deschenes, M. (1988). A review: factors in exercise prescription of resistance training. *Strength Cond J*, 10, 36-41.
- Kraemer, W. J., Fleck, S. J., Dziados, J. E., Harman, E. A., Marchitelli, L. J., Gordon, S. E., Mello, R., Frykman, P. N., Koziris, L. P., & Triplett, N. T. (1993b). Changes in hormonal concentrations after different heavy-resistance exercise protocols in women. *J Appl Physiol*, 75(2), 594-604.
- Kraemer, W. J., Gordon, S. E., Fleck, S. J., Marchitelli, L. J., Mello, R., Dziados, J. E., Friedl, K., Harman, E., Maresh, C., & Fry, A. C. (1991). Endogenous anabolic hormonal and growth factor responses to heavy resistance exercise in males and females. *Int J Sports Med*, 12(2), 228-235.
- Kraemer, W. J., Hakkinen, K., Newton, R. U., Nindl, B. C., Volek, J. S., McCormick, M., Gotshalk, L. A., Gordon, S. E., Fleck, S. J., Campbell, W. W., Putukian, M., & Evans, W. J. (1999). Effects of heavy-resistance training on hormonal response patterns in younger vs. older men. *J Appl Physiol* (1985), 87(3), 982-992.
- Kraemer, W. J., Marchitelli, L., Gordon, S. E., Harman, E., Dziados, J. E., Mello, R., Frykman, P., McCurry, D., & Fleck, S. J. (1990). Hormonal and growth factor

- responses to heavy resistance exercise protocols. *J Appl Physiol*, 69(4), 1442-1450.
- Kraemer, W. J., Noble, B. J., Clark, M. J., & Culver, B. W. (1987). Physiologic responses to heavy-resistance exercise with very short rest periods. *Int J Sports Med*, 8(4), 247-252.
- Kraemer, W. J., & Ratamess, N. A. (2003). Endocrine responses and adaptations to strength and power training. In: *Komi PV, editor. Strength and power in sport. 2nd ed. Malden (MA): Blackwell Scientific Publications*, 361-386.
- Kraemer, W. J., & Ratamess, N. A. (2004). Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. *Med Sci Sports Exerc*, 36(4), 674-688.
- Kraemer, W. J., & Ratamess, N. A. (2005). Hormonal responses and adaptations to resistance exercise and training. *Sports Med*, 35(4), 339-361.
- Kraemer, W. J., Staron, R. S., Hagerman, F. C., Hikida, R. S., Fry, A. C., Gordon, S. E., Nindl, B. C., Gothshalk, L. A., Volek, J. S., Marx, J. O., Newton, R. U., & Hakkinen, K. (1998). The effects of short-term resistance training on endocrine function in men and women. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 78(1), 69-76.
- Kraemer, W. J., Volek, J. S., Bush, J. A., Putukian, M., & Sebastianelli, W. J. (1998). Hormonal responses to consecutive days of heavy-resistance exercise with or without nutritional supplementation. *J Appl Physiol (1985)*, 85(4), 1544-1555.
- Kramer, J. B., Stone, M. H., O'Bryant, H. S., Conley, M. S., Johnson, R. L., Nieman, D. C., Honeycutt, D. R., & Hoke, T. P. (1997). Effects of single vs. multiple sets of weight training: impact of volume, intensity, and variation. *J Strength Cond Res*, 11(3), 143-147.
- Kuipers, H. (1996). How much is too much? Performance aspects of overtraining. *Res Q Exerc Sport*, 67(3 Suppl), S65-69.
- Kuipers, H., & Keizer, H. A. (1988). Overtraining in elite athletes. Review and directions for the future. *Sports Med*, 6(2), 79-92.
- Kumar, D. K., Pah, N. D., & Bradley, A. (2003). Wavelet analysis of surface electromyography to determine muscle fatigue. *IEEE Trans Neural Syst Rehabil Eng*, 11(4), 400-406.

- Lanza, I. R., Wigmore, D. M., Befroy, D. E., & Kent-Braun, J. A. (2006). In vivo ATP production during free-flow and ischaemic muscle contractions in humans. *J Physiol*, 577(Pt 1), 353-367.
- Lawton, T., Cronin, J., Drinkwater, E., Lindsell, R., & Pyne, D. (2004). The effect of continuous repetition training and intra-set rest training on bench press strength and power. *J Sports Med Phys Fitness*, 44(4), 361-367.
- Lawton, T. W., Cronin, J. B., & Lindsell, R. P. (2006). Effect of interrepetition rest intervals on weight training repetition power output. *J Strength Cond Res*, 20(1), 172-176.
- Legaz-Arrese, A., Lopez-Laval, I., George, K., Puente-Lanzarote, J. J., Mayolas-Pi, C., Serrano-Ostariz, E., Revilla-Marti, P., Moliner-Urdiales, D., & Reverter-Masia, J. (2015). Impact of an endurance training program on exercise-induced cardiac biomarker release. *Am J Physiol Heart Circ Physiol*, 308(8), H913-920.
- Leite, R. D., Prestes, J., Rosa, C., De Salles, B. F., Maior, A., Miranda, H., & Simao, R. (2011). Acute effect of resistance training volume on hormonal responses in trained men. *J Sports Med Phys Fitness*, 51(2), 322-328.
- Levenez, M., Garland, S. J., Klass, M., & Duchateau, J. (2008). Cortical and spinal modulation of antagonist coactivation during a submaximal fatiguing contraction in humans. *J Neurophysiol*, 99(2), 554-563.
- Levenez, M., Kotzamanidis, C., Carpentier, A., & Duchateau, J. (2005). Spinal reflexes and coactivation of ankle muscles during a submaximal fatiguing contraction. *J Appl Physiol (1985)*, 99(3), 1182-1188.
- Lindinger, M. I., & Heigenhauser, G. J. (1991). The roles of ion fluxes in skeletal muscle fatigue. *Can J Physiol Pharmacol*, 69(2), 246-253.
- Looney, D. P., Kraemer, W. J., Joseph, M. F., Comstock, B. A., Denegar, C. R., Flanagan, S. D., Newton, R. U., Szivak, T. K., DuPont, W. H., Hooper, D. R., Hakkinen, K., & Maresh, C. M. (2016). Electromyographical and perceptual responses to different resistance intensities in a squat protocol: Does performing sets to failure with light loads produce the same activity? *J Strength Cond Res*, 30(3), 792-799.

- Loturco, I., Pereira, L. A., Cal Abad, C. C., Gil, S., Kitamura, K., Kobal, R., & Nakamura, F. Y. (2016). Using bar velocity to predict the maximum dynamic strength in the half-squat exercise. *Int J Sports Physiol Perform*, 11(5), 697-700.
- MacDougall, J. D., Ray, S., Sale, D. G., McCartney, N., Lee, P., & Garner, S. (1999). Muscle substrate utilization and lactate production. *Can J Appl Physiol*, 24(3), 209-215.
- MacIntosh, B. R., & Rassier, D. E. (2002). What is fatigue? *Can J Appl Physiol*, 27(1), 42-55.
- Maffiuletti, N. A., & Bendahan, D. (2009). Measurement methods of muscle fatigue. In: Williams, C. A., Ratel, S., editors. *Human Muscle Fatigue*. New York (NY): Routledge, 17-47.
- Maluf, K. S., & Enoka, R. M. (2005). Task failure during fatiguing contractions performed by humans. *J Appl Physiol* (1985), 99(2), 389-396.
- Maluf, K. S., Shinohara, M., Stephenson, J. L., & Enoka, R. M. (2005). Muscle activation and time to task failure differ with load type and contraction intensity for a human hand muscle. *Exp Brain Res*, 167(2), 165-177.
- Mann, J. B., Ivey, P. J., Brechue, W. F., & Mayhew, J. L. (2014). Reliability and smallest worthwhile difference of the NFL-225 test in NCAA Division I football players. *J Strength Cond Res*, 28(5), 1427-1432.
- Mann, T. N., Lamberts, R. P., & Lambert, M. I. (2014). High responders and low responders: factors associated with individual variation in response to standardized training. *Sports Med*, 44(8), 1113-1124.
- Marshall, P. W., Robbins, D. A., Wrightson, A. W., & Siegler, J. C. (2012). Acute neuromuscular and fatigue responses to the rest-pause method. *J Sci Med Sport*, 15(2), 153-158.
- Martin, P. G., Gandevia, S. C., & Taylor, J. L. (2006). Output of human motoneuron pools to corticospinal inputs during voluntary contractions. *J Neurophysiol*, 95(6), 3512-3518.
- Marx, J. O., Ratamess, N. A., Nindl, B. C., Gotshalk, L. A., Volek, J. S., Dohi, K., Bush, J. A., Gomez, A. L., Mazzetti, S. A., Fleck, S. J., Hakkinen, K., Newton, R.



- U., & Kraemer, W. J. (2001). Low-volume circuit versus high-volume periodized resistance training in women. *Med Sci Sports Exerc*, 33(4), 635-643.
- Masuda, K., Masuda, T., Sadoyama, T., Inaki, M., & Katsuta, S. (1999). Changes in surface EMG parameters during static and dynamic fatiguing contractions. *J Electromyogr Kinesiol*, 9(1), 39-46.
- Matuszak, M. E., Fry, A. C., Weiss, L. W., Ireland, T. R., & McKnight, M. M. (2003). Effect of rest interval length on repeated 1 repetition maximum back squats. *J Strength Cond Res*, 17(4), 634-637.
- Mayhew, J. L., Ball, T. E., Arnold, M. D., & Bowen, J. C. (1992). Relative muscular endurance performance as a predictor of bench press strength in college men and women. *J Appl Sports Sci Res*, 6, 200-206.
- Mazzetti, S., Douglass, M., Yocum, A., & Harber, M. (2007). Effect of explosive versus slow contractions and exercise intensity on energy expenditure. *Med Sci Sports Exerc*, 39(8), 1291-1301.
- McBride, J. M., Blaak, J. B., & Triplett-McBride, T. (2003). Effect of resistance exercise volume and complexity on EMG, strength, and regional body composition. *Eur J Appl Physiol*, 90(5-6), 626-632.
- McCall, G. E., Byrnes, W. C., Fleck, S. J., Dickinson, A., & Kraemer, W. J. (1999). Acute and chronic hormonal responses to resistance training designed to promote muscle hypertrophy. *Can J Appl Physiol*, 24(1), 96-107.
- McCaulley, G. O., McBride, J. M., Cormie, P., Hudson, M. B., Nuzzo, J. L., Quindry, J. C., & Travis Triplett, N. (2009). Acute hormonal and neuromuscular responses to hypertrophy, strength and power type resistance exercise. *Eur J Appl Physiol*, 105(5), 695-704.
- McCully, K. K., Authier, B., Olive, J., & Clark, B. J., 3rd. (2002). Muscle fatigue: the role of metabolism. *Can J Appl Physiol*, 27(1), 70-82.
- McDonagh, M. J., & Davies, C. T. (1984). Adaptive response of mammalian skeletal muscle to exercise with high loads. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 52(2), 139-155.

- McInnes, S. E., Carlson, J. S., Jones, C. J., & McKenna, M. J. (1995). The physiological load imposed on basketball players during competition. *J Sports Sci*, 13(5), 387-397.
- McNeil, C. J., Murray, B. J., & Rice, C. L. (2006). Differential changes in muscle oxygenation between voluntary and stimulated isometric fatigue of human dorsiflexors. *J Appl Physiol (1985)*, 100(3), 890-895.
- Millar, N. C., & Homsher, E. (1990). The effect of phosphate and calcium on force generation in glycerinated rabbit skeletal muscle fibers. A steady-state and transient kinetic study. *J Biol Chem*, 265(33), 20234-20240.
- Miranda, H., Simao, R., Moreira, L. M., de Souza, R. A., de Souza, J. A., de Salles, B. F., & Willardson, J. M. (2009). Effect of rest interval length on the volume completed during upper body resistance exercise. *J Sports Sci Med*, 8(3), 388-392.
- Mizrahi, J., Levin, O., Aviram, A., Isakov, E., & Susak, Z. (1997). Muscle fatigue in interrupted stimulation: Effect of partial recovery on force and EMG dynamics. *J Electromyogr Kinesiol*, 7(1), 51-65.
- Molina, R., & Denadai, B. S. (2012). Dissociated time course recovery between rate of force development and peak torque after eccentric exercise. *Clin Physiol Funct Imaging*, 32(3), 179-184.
- Mora-Custodio, R., Rodríguez-Rosell, D., Pareja-Blanco, F., Yáñez-García, J. M., & González-Badillo, J. J. (2016). Effect of low- vs. moderate-load squat training on strength, jump and sprint performance in physically active women. *Int J Sports Med*, 37(6), 476-482.
- Morais de Oliveira, A. L., Greco, C. C., Molina, R., & Denadai, B. S. (2012). The rate of force development obtained at early contraction phase is not influenced by active static stretching. *J Strength Cond Res*, 26(8), 2174-2179.
- Moritani, T., & deVries, H. A. (1979). Neural factors versus hypertrophy in the time course of muscle strength gain. *Am J Phys Med*, 58(3), 115-130.
- Moritani, T., Muro, M., & Nagata, A. (1986). Intramuscular and surface electromyogram changes during muscle fatigue. *J Appl Physiol (1985)*, 60(4), 1179-1185.

- Morrissey, M. C., Harman, E. A., Frykman, P. N., & Han, K. H. (1998). Early phase differential effects of slow and fast barbell squat training. *Am J Sports Med*, 26(2), 221-230.
- Mujika, I. (1998). The influence of training characteristics and tapering on the adaptation in highly trained individuals: a review. *Int J Sports Med*, 19(7), 439-446.
- Mujika, I., & Padilla, S. (2003). Scientific bases for precompetition tapering strategies. *Med Sci Sports Exerc*, 35(7), 1182-1187.
- Mulligan, S. E., Fleck, S. J., Gordon, S. E., Koziris, L. P., Triplett-McBride, N. T., & Kraemer, W. J. (1996). Influence of resistance exercise volume on serum growth hormone and cortisol concentrations in women. *J Strength Cond Res*, 10(4), 256-262.
- Munkvik, M., Lunde, P. K., & Sejersted, O. M. (2009). Causes of fatigue in slow-twitch rat skeletal muscle during dynamic activity. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 297(3), R900-910.
- Munn, J., Herbert, R. D., Hancock, M. J., & Gandevia, S. C. (2005). Resistance training for strength: effect of number of sets and contraction speed. *Med Sci Sports Exerc*, 37(9), 1622-1626.
- Murphy, A. J., & Wilson, G. J. (1996a). The assessment of human dynamic muscular function: a comparison of isoinertial and isokinetic tests. *J Sports Med Phys Fitness*, 36(3), 169-177.
- Murphy, A. J., & Wilson, G. J. (1996b). Poor correlations between isometric tests and dynamic performance: relationship to muscle activation. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 73(3-4), 353-357.
- Murphy, A. J., Wilson, G. J., & Pryor, J. F. (1994). Use of the iso-inertial force mass relationship in the prediction of dynamic human performance. *Eur J Appl Physiol*, 69(3), 250-257.
- Murphy, R. M., Stephenson, D. G., & Lamb, G. D. (2004). Effect of creatine on contractile force and sensitivity in mechanically skinned single fibers from rat skeletal muscle. *Am J Physiol Cell Physiol*, 287(6), C1589-1595.

- Mygind, E. (1995). Fibre characteristics and enzyme levels of arm and leg muscles in elite cross-country skiers. *Scand J Med Sci Sports*, 5(2), 76-80.
- Nagaya, N., & Herrera, A. A. (1995). Effects of testosterone on synaptic efficacy at neuromuscular junctions in a sexually dimorphic muscle of male frogs. *J Physiol*, 483 ( Pt 1), 141-153.
- Newton, R. U., Kraemer, W. J., Häkkinen, K., Humphries, B., & Murphy, A. J. (1996). Kinematics, kinetics and muscle activation during explosive upper body movements. *J Appl Biomech*, 12, 31-43.
- Neyroud, D., Maffiuletti, N. A., Kayser, B., & Place, N. (2012). Mechanisms of fatigue and task failure induced by sustained submaximal contractions. *Med Sci Sports Exerc*, 44(7), 1243-1251.
- Ogasawara, R., Akimoto, T., Umeno, T., Sawada, S., Hamaoka, T., & Fujita, S. (2016). MicroRNA expression profiling in skeletal muscle reveals different regulatory patterns in high and low responders to resistance training. *Physiol Genomics*, 48(4), 320-324.
- Oliveira, A. S., Corvino, R. B., Caputo, F., Aagaard, P., & Denadai, B. S. (2016). Effects of fast-velocity eccentric resistance training on early and late rate of force development. *Eur J Sport Sci*, 16(2), 199-205.
- Oliveira, F. B., Oliveira, A. S., Rizzato, G. F., & Denadai, B. S. (2013). Resistance training for explosive and maximal strength: effects on early and late rate of force development. *J Sports Sci Med*, 12(3), 402-408.
- Oliver, J. M., Jagim, A. R., Sánchez, A. C., Mardock, M. A., Kelly, K. A., Meredith, H. J., Smith, G. L., Greenwood, M., Parker, J. L., Riechman, S. E., Fluckey, J. D., Crouse, S. F., & Kreider, R. B. (2013). Greater gains in strength and power with intraset rest intervals in hypertrophic training. *J Strength Cond Res*, 27(11), 3116-3131.
- Pallares, J. G., Sánchez-Medina, L., Perez, C. E., De La Cruz-Sánchez, E., & Mora-Rodríguez, R. (2014). Imposing a pause between the eccentric and concentric phases increases the reliability of isoinertial strength assessments. *J Sports Sci*, 32(12), 1165-1175.

- Pareja-Blanco, F. (2016). La velocidad de ejecución como factor determinante de las adaptaciones producidas por el entrenamiento de fuerza (Tesis Doctoral). Universidad Pablo de Olavide, Sevilla, España.
- Pareja-Blanco, F., Rodríguez-Rosell, D., Sánchez-Medina, L., Gorostiaga, E. M., & González-Badillo, J. J. (2014). Effect of movement velocity during resistance training on neuromuscular performance. *Int J Sports Med*, 35(11), 916-924.
- Pareja-Blanco, F., Rodríguez-Rosell, D., Sánchez-Medina, L., Ribas-Serna, J., Lopez-Lopez, C., Mora-Custodio, R., Yanez-Garcia, J. M., & González-Badillo, J. J. (2016a). Acute and delayed response to resistance exercise leading or not leading to muscle failure. *Clin Physiol Funct Imaging*.
- Pareja-Blanco, F., Rodríguez-Rosell, D., Sánchez-Medina, L., Sanchis-Moysi, J., Dorado, C., Mora-Custodio, R., Yanez-Garcia, J. M., Morales-Alamo, D., Perez-Suarez, I., Calbet, J. A., & González-Badillo, J. J. (2016b). Effects of velocity loss during resistance training on athletic performance, strength gains and muscle adaptations. *Scand J Med Sci Sports*.
- Pareja-Blanco, F., Sánchez-Medina, L., Suarez-Arrones, L., & González-Badillo, J. J. (2016). Effects of velocity loss during resistance training on performance in professional soccer players. *Int J Sports Physiol Perform*, 1-24.
- Penailillo, L., Blazeovich, A., Numazawa, H., & Nosaka, K. (2015). Rate of force development as a measure of muscle damage. *Scand J Med Sci Sports*, 25(3), 417-427.
- Penailillo, L., Silvestre, R., & Nosaka, K. (2013). Changes in surface EMG assessed by discrete wavelet transform during maximal isometric voluntary contractions following supramaximal cycling. *Eur J Appl Physiol*, 113(4), 895-904.
- Pereira, M. I., & Gomes, P. S. (2003). Movement velocity in resistance training. *Sports Med*, 33(6), 427-438.
- Pereira, M. I., & Gomes, P. S. (2007). Effects of isotonic resistance training at two movement velocities on strength gains. *Rev Bras Med Esporte*, 13(2), 79-83.
- Peterson, M. D., Rhea, M. R., & Alvar, B. A. (2004). Maximizing strength development in athletes: a meta-analysis to determine the dose-response relationship. *J Strength Cond Res*, 18(2), 377-382.

- Peterson, M. D., Rhea, M. R., & Alvar, B. A. (2005). Applications of the dose-response for muscular strength development: a review of meta-analytic efficacy and reliability for designing training prescription. *J Strength Cond Res*, 19(4), 950-958.
- Phillips, S. M. (2009). Physiologic and molecular bases of muscle hypertrophy and atrophy: impact of resistance exercise on human skeletal muscle (protein and exercise dose effects). *Appl Physiol Nutr Metab*, 34(3), 403-410.
- Place, N., Yamada, T., Bruton, J. D., & Westerblad, H. (2010). Muscle fatigue: from observations in humans to underlying mechanisms studied in intact single muscle fibres. *Eur J Appl Physiol*, 110(1), 1-15.
- Pousson, M., Amiridis, I. G., Cometti, G., & Van Hoecke, J. (1999). Velocity-specific training in elbow flexors. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 80(4), 367-372.
- Prestes, J., da Cunha Nascimento, D., Tibana, R. A., Teixeira, T. G., Vieira, D. C., Tajra, V., de Farias, D. L., Silva, A. O., Funghetto, S. S., de Souza, V. C., & Nalva, J. W. (2015). Understanding the individual responsiveness to resistance training periodization. *Age (Dordr)*, 37(3), 9793.
- Raastad, T., Glomsheller, T., Bjoro, T., & Hallen, J. (2001). Changes in human skeletal muscle contractility and hormone status during 2 weeks of heavy strength training. *Eur J Appl Physiol*, 84(1-2), 54-63.
- Rarick, G. L., & Larsen, G. L. (1959). The effect of variations in the intensity and frequency of isometric muscular effort on the development of static muscular strength in pre-pubescent males. *Int Z Angew Physiol*, 18, 13-21.
- Ratamess, N. A., Alvar, B. A., Evetoch, T. K., Housh, T. J., Kibler, W. B., Kraemer, W. J., & Triplett, N. T. (2009). American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. *Med Sci Sports Exerc*, 41(3), 687-708.
- Ratamess, N. A., Falvo, M. J., Mangine, G. T., Hoffman, J. R., Faigenbaum, A. D., & Kang, J. (2007). The effect of rest interval length on metabolic responses to the bench press exercise. *Eur J Appl Physiol*, 100(1), 1-17.
- Ratamess, N. A., Kraemer, W. J., Volek, J. S., Maresh, C. M., Vanheest, J. L., Sharman, M. J., Rubin, M. R., French, D. N., Vescovi, J. D., Silvestre, R., Hatfield, D. L.,

- Fleck, S. J., & Deschenes, M. R. (2005). Androgen receptor content following heavy resistance exercise in men. *J Steroid Biochem Mol Biol*, 93(1), 35-42.
- Rehn, T. A., Borge, B. A., Lunde, P. K., Munkvik, M., Sneve, M. L., Grondahl, F., Aronsen, J. M., Sjaastad, I., Prydz, K., Kolset, S. O., Wiig, H., Sejersted, O. M., & Iversen, P. O. (2009). Temporary fatigue and altered extracellular matrix in skeletal muscle during progression of heart failure in rats. *Am J Physiol Regul Integr Comp Physiol*, 297(1), R26-33.
- Reynolds, J. M., Gordon, T. J., & Robergs, R. A. (2006). Prediction of one repetition maximum strength from multiple repetition maximum testing and anthropometry. *J Strength Cond Res*, 20(3), 584-592.
- Rhea, M. R. (2004). Determining the magnitude of treatment effects in strength training research through the use of the effect size. *J Strength Cond Res*, 18(4), 918-920.
- Rhea, M. R., Alvar, B. A., Burkett, L. N., & Ball, S. D. (2003). A meta-analysis to determine the dose response for strength development. *Med Sci Sports Exerc*, 35(3), 456-464.
- Richens, B., & Cleather, D. J. (2014). The relationship between the number of repetitions performed at given intensities is different in endurance and strength trained athletes. *Biol Sport*, 31(2), 157-161.
- Richmond, S. R., & Godard, M. P. (2004). The effects of varied rest periods between sets to failure using the bench press in recreationally trained men. *J Strength Cond Res*, 18(4), 846-849.
- Robinson, J. M., Stone, M. H., Johnson, R. L., Penland, C. M., Warren, B. J., & Lewis, R. D. (1995). Effects of different weight training exercise/rest intervals on strength, power, and high intensity exercise endurance. *J Strength Cond Res*, 9(4), 216-221.
- Rodríguez-Rosell, D., Franco-Márquez, F., Pareja-Blanco, F., Mora-Custodio, R., Yanez-Garcia, J. M., González-Suarez, J. M., & González-Badillo, J. J. (2016). Effects of 6 weeks resistance training combined with plyometric and speed exercises on physical performance of pre-peak-height-velocity soccer players. *Int J Sports Physiol Perform*, 11(2), 240-246.

- Rodríguez-Rosell, D., Torres-Torrelo, J., Franco-Márquez, F., González-Suarez, J. M., & González-Badillo, J. J. (2017). Effects of light-load maximal lifting velocity weight training vs. combined weight training and plyometrics on sprint, vertical jump and strength performance in adult soccer players. *J Sci Med Sport*.
- Rohling, M., Herder, C., Roden, M., Stemper, T., & Mussig, K. (2016). Effects of long-term exercise interventions on glycaemic control in type 1 and type 2 diabetes: a systematic review. *Exp Clin Endocrinol Diabetes*.
- Rønnestad, B. R., Egeland, W., Kvalme, N. H., Refsnes, P. E., Kadi, F., & Raastad, T. (2007). Dissimilar effects of one- and three-set strength training on strength and muscle mass gains in upper and lower body in untrained subjects. *J Strength Cond Res*, 21(1), 157-163.
- Rønnestad, B. R., Kvalme, N. H., Sunde, A., & Raastad, T. (2008). Short-term effects of strength and plyometric training on sprint and jump performance in professional soccer players. *J Strength Cond Res*, 22(3), 773-780.
- Rønnestad, B. R., Nygaard, H., & Raastad, T. (2011). Physiological elevation of endogenous hormones results in superior strength training adaptation. *Eur J Appl Physiol*, 111(9), 2249-2259.
- Rontu, J. P., Hannula, M. I., Leskinen, S., Linnamo, V., & Salmi, J. A. (2010). One-repetition maximum bench press performance estimated with a new accelerometer method. *J Strength Cond Res*, 24(8), 2018-2025.
- Rooney, K. J., Herbert, R. D., & Balnave, R. J. (1994). Fatigue contributes to the strength training stimulus. *Med Sci Sports Exerc*, 26(9), 1160-1164.
- Rubin, M. R., Kraemer, W. J., Maresh, C. M., Volek, J. S., Ratamess, N. A., Vanheest, J. L., Silvestre, R., French, D. N., Sharman, M. J., Judelson, D. A., Gomez, A. L., Vescovi, J. D., & Hymer, W. C. (2005). High-affinity growth hormone binding protein and acute heavy resistance exercise. *Med Sci Sports Exerc*, 37(3), 395-403.
- Rudroff, T., Staudenmann, D., & Enoka, R. M. (2008). Electromyographic measures of muscle activation and changes in muscle architecture of human elbow flexors during fatiguing contractions. *J Appl Physiol (1985)*, 104(6), 1720-1726.



- Ruotsalainen, I., Ahtiainen, J. P., Kidgell, D. J., & Avela, J. (2014). Changes in corticospinal excitability during an acute bout of resistance exercise in the elbow flexors. *Eur J Appl Physiol*, 114(7), 1545-1553.
- Saez de Villarreal, E., Requena, B., Izquierdo, M., & González-Badillo, J. J. (2013). Enhancing sprint and strength performance: combined versus maximal power, traditional heavy-resistance and plyometric training. *J Sci Med Sport*, 16(2), 146-150.
- Sahaly, R., Vandewalle, H., Driss, T., & Monod, H. (2001). Maximal voluntary force and rate of force development in humans--importance of instruction. *Eur J Appl Physiol*, 85(3-4), 345-350.
- Sahlin, K. (1992). Metabolic factors in fatigue. *Sports Med*, 13(2), 99-107.
- Sakamoto, A., & Sinclair, P. J. (2006). Effect of movement velocity on the relationship between training load and the number of repetitions of bench press. *J Strength Cond Res*, 20(3), 523-527.
- Sale, D. G. (1987). Influence of exercise and training on motor unit activation. *Exerc Sport Sci Rev*, 15, 95-151.
- Sale, D. G. (1988). Neural adaptation to resistance training. *Med Sci Sports Exerc*, 20(5 Suppl), S135-145.
- Sale, D. G. (1992). Neural adaptation to strength training. In: *Strength and power in sport*. Edited by P. Komi. Blackwell Scientific Publications. London, 249-266.
- Saltychev, M., Barlund, E., Paltamaa, J., Katajapuu, N., & Laimi, K. (2016). Progressive resistance training in Parkinson's disease: a systematic review and meta-analysis. *BMJ Open*, 6(1), e008756.
- Sampson, J. A., & Groeller, H. (2016). Is repetition failure critical for the development of muscle hypertrophy and strength? *Scand J Med Sci Sports*, 26(4), 375-383.
- Sanborn, K., Boros, R., Hrubby, J., Schilling, B., O'bryant, H., Johnson, R. L., Hoke, T., Stone, M. E., & Stone, M. H. (2000). Short-term performance effects of weight training with multiple sets not to failure vs. a single set to failure in women. *J Strength Cond Res*, 14(3), 328-331.
- Sánchez-Medina, L., García-Pallarés, J., Pérez, C. E., Fernandes, J., & González Badillo, J. J. (2011). Estimation of relative load from mean velocity in the full

- squat exercise. In: *Cable NT, George K, ed. Book of Abstracts of the 16th Annual Congress of the European College of Sports Science. Liverpool, UK: Liverpool John Moores University, 669.*
- Sánchez-Medina, L., & González-Badillo, J. J. (2011). Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Med Sci Sports Exerc*, 43(9), 1725-1734.
- Sánchez-Medina, L., González-Badillo, J. J., Perez, C. E., & Pallares, J. G. (2014). Velocity- and power-load relationships of the bench pull vs. bench press exercises. *Int J Sports Med*, 35(3), 209-216.
- Sánchez-Medina, L., Pallarés, J. G., Pérez, C. E., Morán-Navarro, R., & González-Badillo, J. J. (2017). Estimation of relative load from bar velocity in the full back squat exercise. *Sports Med Int Open*, 1(2), E80-E88.
- Sánchez-Medina, L., Perez, C. E., & González-Badillo, J. J. (2010). Importance of the propulsive phase in strength assessment. *Int J Sports Med*, 31(2), 123-129.
- Sánchez-Moreno, M., Rodríguez-Rosell, D., Pareja-Blanco, F., Mora-Custodio, R., & González-Badillo, J. J. (2017). Movement velocity as indicator of relative intensity and level of effort attained during the set in pull-up exercise. *Int J Sports Physiol Perform*, 1-23.
- Sanchis-Moysi, J., Idoate, F., Olmedillas, H., Guadalupe-Grau, A., Alayon, S., Carreras, A., Dorado, C., & Calbet, J. A. (2010). The upper extremity of the professional tennis player: muscle volumes, fiber-type distribution and muscle strength. *Scand J Med Sci Sports*, 20(3), 524-534.
- Scudese, E., Willardson, J. M., Simao, R., Senna, G., de Salles, B. F., & Miranda, H. (2015). The effect of rest interval length on repetition consistency and perceived exertion during near maximal loaded bench press sets. *J Strength Cond Res*, 29(11), 3079-3083.
- Schantz, P., Randall-Fox, E., Hutchison, W., Tyden, A., & Astrand, P. O. (1983). Muscle fibre type distribution, muscle cross-sectional area and maximal voluntary strength in humans. *Acta Physiol Scand*, 117(2), 219-226.

- Schilling, B. K., Falvo, M. J., & Chiu, L. Z. (2008). Force-velocity, impulse-momentum relationships: implications for efficacy of purposefully slow resistance training. *J Sports Sci Med*, 7(2), 299-304.
- Schoenfeld, B. J. (2010). The mechanisms of muscle hypertrophy and their application to resistance training. *J Strength Cond Res*, 24(10), 2857-2872.
- Schoenfeld, B. J. (2013a). Postexercise hypertrophic adaptations: a reexamination of the hormone hypothesis and its applicability to resistance training program design. *J Strength Cond Res*, 27(6), 1720-1730.
- Schoenfeld, B. J. (2013b). Potential mechanisms for a role of metabolic stress in hypertrophic adaptations to resistance training. *Sports Med*, 43(3), 179-194.
- Schoenfeld, B. J., Contreras, B., Willardson, J. M., Fontana, F., & Tiriyaki-Sonmez, G. (2014). Muscle activation during low- versus high-load resistance training in well-trained men. *Eur J Appl Physiol*, 114(12), 2491-2497.
- Schoenfeld, B. J., Ogborn, D., & Krieger, J. W. (2017). Dose-response relationship between weekly resistance training volume and increases in muscle mass: A systematic review and meta-analysis. *J Sports Sci*, 35(11), 1073-1082.
- Schoenfeld, B. J., Ogborn, D. I., & Krieger, J. W. (2015). Effect of repetition duration during resistance training on muscle hypertrophy: a systematic review and meta-analysis. *Sports Med*, 45(4), 577-585.
- Schoenfeld, B. J., Pope, Z. K., Benik, F. M., Hester, G. M., Sellers, J., Nooner, J. L., Schnaiter, J. A., Bond-Williams, K. E., Carter, A. S., Ross, C. L., Just, B. L., Henselmans, M., & Krieger, J. W. (2016). Longer intersets enhance muscle strength and hypertrophy in resistance-trained men. *J Strength Cond Res*, 30(7), 1805-1812.
- Schott, J., McCully, K., & Rutherford, O. M. (1995). The role of metabolites in strength training. II. Short versus long isometric contractions. *Eur J Appl Physiol Occup Physiol*, 71(4), 337-341.
- Seitz, L. B., Reyes, A., Tran, T. T., Saez de Villarreal, E., & Haff, G. G. (2014). Increases in lower-body strength transfer positively to sprint performance: a systematic review with meta-analysis. *Sports Med*, 44(12), 1693-1702.

- Serrano-Ostariz, E., Terreros-Blanco, J. L., Legaz-Arrese, A., George, K., Shave, R., Bocos-Terraz, P., Izquierdo-Alvarez, S., Bancalero, J. L., Echavarri, J. M., Quilez, J., Aragonés, M. T., & Carranza-García, L. E. (2011). The impact of exercise duration and intensity on the release of cardiac biomarkers. *Scand J Med Sci Sports*, 21(2), 244-249.
- Seynnes, O. R., de Boer, M., & Narici, M. V. (2007). Early skeletal muscle hypertrophy and architectural changes in response to high-intensity resistance training. *J Appl Physiol* (1985), 102(1), 368-373.
- Sforzo, G. A., & Touey, P. R. (1996). Manipulating exercise order affects muscular performance during a resistance exercise training session. *J Strength Cond Res*, 10(1), 20-24.
- Shair, E. F., Ahmad, S. A., Marhaban, M. H., Mohd Tamrin, S. B., & Abdullah, A. R. (2017). EMG processing based measures of fatigue assessment during manual lifting. *BioMed Research International*.
- Shimano, T., Kraemer, W. J., Spiering, B. A., Volek, J. S., Hatfield, D. L., Silvestre, R., Vingren, J. L., Fragala, M. S., Maresh, C. M., Fleck, S. J., Newton, R. U., Spreuwenberg, L. P., & Hakkinen, K. (2006). Relationship between the number of repetitions and selected percentages of one repetition maximum in free weight exercises in trained and untrained men. *J Strength Cond Res*, 20(4), 819-823.
- Shiran, M. Y., Kordi, M. R., Ziaee, V., Ravasi, A., & Mansournia, M. A. (2008). The effect of aquatic and land plyometric training on physical performance and muscular enzymes in male wrestlers. *Research Journal of Biological Sciences* 3(5), 457-461.
- Simão, R., Polito, M. D., & Monteiro, W. (2008). Effects of different rest intervals in a resistance training program for trained individuals. *Braz J Sport Med*, 14, 353-356.
- Smilios, I., Hakkinen, K., & Tokmakidis, S. P. (2010). Power output and electromyographic activity during and after a moderate load muscular endurance session. *J Strength Cond Res*, 24(8), 2122-2131.
- Smilios, I., Pilianidis, T., Karamouzis, M., & Tokmakidis, S. P. (2003). Hormonal responses after various resistance exercise protocols. *Med Sci Sports Exerc*, 35(4), 644-654.

- Smith, C. M., Housh, T. J., Jenkins, N. D., Hill, E. C., Cochrane, K. C., Miramonti, A. A., Schmidt, R. J., & Johnson, G. O. (2016). Combining regression and mean comparisons to identify the time course of changes in neuromuscular responses during the process of fatigue. *Physiol Meas*, 37(11), 1993-2002.
- So, R. C., Ng, J. K., Lam, R. W., Lo, C. K., & Ng, G. Y. (2009). EMG wavelet analysis of quadriceps muscle during repeated knee extension movement. *Med Sci Sports Exerc*, 41(4), 788-796.
- Sogaard, K., Gandevia, S. C., Todd, G., Petersen, N. T., & Taylor, J. L. (2006). The effect of sustained low-intensity contractions on supraspinal fatigue in human elbow flexor muscles. *J Physiol*, 573(Pt 2), 511-523.
- Sooneste, H., Tanimoto, M., Kakigi, R., Saga, N., & Katamoto, S. (2013). Effects of training volume on strength and hypertrophy in young men. *J Strength Cond Res*, 27(1), 8-13.
- Spiering, B. A., Kraemer, W. J., Anderson, J. M., Armstrong, L. E., Nindl, B. C., Volek, J. S., & Maresh, C. M. (2008). Resistance exercise biology: manipulation of resistance exercise programme variables determines the responses of cellular and molecular signalling pathways. *Sports Med*, 38(7), 527-540.
- Spriet, L. L., Soderlund, K., Bergstrom, M., & Hultman, E. (1987a). Anaerobic energy release in skeletal muscle during electrical stimulation in men. *J Appl Physiol* (1985), 62(2), 611-615.
- Spriet, L. L., Soderlund, K., Bergstrom, M., & Hultman, E. (1987b). Skeletal muscle glycogenolysis, glycolysis, and pH during electrical stimulation in men. *J Appl Physiol* (1985), 62(2), 616-621.
- Staudenmann, D., Roeleveld, K., Stegeman, D. F., & van Dieen, J. H. (2010). Methodological aspects of SEMG recordings for force estimation--a tutorial and review. *J Electromyogr Kinesiol*, 20(3), 375-387.
- Stegeman, D. F., Blok, J. H., Hermens, H. J., & Roeleveld, K. (2000). Surface EMG models: properties and applications. *J Electromyogr Kinesiol*, 10(5), 313-326.
- Stone, M. H., O'Bryant, H. S., McCoy, L., Coglianese, R., Lehmkuhl, M., & Schilling, B. (2003). Power and maximum strength relationships during performance of dynamic and static weighted jumps. *J Strength Cond Res*, 17(1), 140-147.

- Stone, W. J., & Coulter, S. P. (1994). Strength/endurance effects from three resistance training protocols with women. *J Strength Cond Res*, 8, 231-234.
- Street, D., Bangsbo, J., & Juel, C. (2001). Interstitial pH in human skeletal muscle during and after dynamic graded exercise. *J Physiol*, 537(Pt 3), 993-998.
- Sundstrup, E., Jakobsen, M. D., Andersen, C. H., Zebis, M. K., Mortensen, O. S., & Andersen, L. L. (2012). Muscle activation strategies during strength training with heavy loading vs. repetitions to failure. *J Strength Cond Res*, 26(7), 1897-1903.
- Tan, B. (1999). Manipulating resistance training program variables to optimize maximum strength in men: a review. *J Strength Cond Res*, 13, 289-304.
- Terzis, G., Spengos, K., Manta, P., Sarris, N., & Georgiadis, G. (2008). Fiber type composition and capillary density in relation to submaximal number of repetitions in resistance exercise. *J Strength Cond Res*, 22(3), 845-850.
- Tesch, P. A., Dudley, G. A., Duvoisin, M. R., Hather, B. M., & Harris, R. T. (1990). Force and EMG signal patterns during repeated bouts of concentric or eccentric muscle actions. *Acta Physiol Scand*, 138(3), 263-271.
- Tesch, P. A., Komi, P. V., & Hakkinen, K. (1987). Enzymatic adaptations consequent to long-term strength training. *Int J Sports Med*, 8 Suppl 1, 66-69.
- Thorlund, J. B., Aagaard, P., & Madsen, K. (2009). Rapid muscle force capacity changes after soccer match play. *Int J Sports Med*, 30(4), 273-278.
- Thornell, L. E., Lindstrom, M., Renault, V., Mouly, V., & Butler-Browne, G. S. (2003). Satellite cells and training in the elderly. *Scand J Med Sci Sports*, 13(1), 48-55.
- Tidow, G. (1995). Muscular adaptations induced by training and detraining. A review of biopsy studies. *New Studies in Athletics*, 10, 47-56.
- Tillin, N. A., & Folland, J. P. (2014). Maximal and explosive strength training elicit distinct neuromuscular adaptations, specific to the training stimulus. *Eur J Appl Physiol*, 114(2), 365-374.
- Toigo, M., & Boutellier, U. (2006). New fundamental resistance exercise determinants of molecular and cellular muscle adaptations. *Eur J Appl Physiol*, 97(6), 643-663.
- Torres-Torrelo, J., Rodríguez-Rosell, D., & González-Badillo, J. J. (2017). Light-load maximal lifting velocity full squat training program improves important physical and skill characteristics in futsal players. *J Sports Sci*, 35(10), 967-975.

- Tran, Q. T., Docherty, D., & Behm, D. (2006). The effects of varying time under tension and volume load on acute neuromuscular responses. *Eur J Appl Physiol*, 98(4), 402-410.
- Turki, O., Chaouachi, A., Behm, D. G., Chtara, H., Chtara, M., Bishop, D., Chamari, K., & Amri, M. (2012). The effect of warm-ups incorporating different volumes of dynamic stretching on 10- and 20-m sprint performance in highly trained male athletes. *J Strength Cond Res*, 26(1), 63-72.
- Ullrich, B., Holzinger, S., Soleimani, M., Pelzer, T., Stening, J., & Pfeiffer, M. (2015). Neuromuscular Responses to 14 Weeks of Traditional and Daily Undulating Resistance Training. *Int J Sports Med*, 36(7), 554-562.
- Ullrich, B., Pelzer, T., Oliveira, S., & Pfeiffer, M. (2016). Neuromuscular responses to short-term resistance training with traditional and daily undulating periodization in adolescent elite judoka. *J Strength Cond Res*, 30(8), 2083-2099.
- Van Cutsem, M., & Duchateau, J. (2005). Preceding muscle activity influences motor unit discharge and rate of torque development during ballistic contractions in humans. *J Physiol*, 562(Pt 2), 635-644.
- Van Cutsem, M., Duchateau, J., & Hainaut, K. (1998). Changes in single motor unit behaviour contribute to the increase in contraction speed after dynamic training in humans. *J Physiol*, 513 ( Pt 1), 295-305.
- Varley, M. C., Gabbett, T., & Aughey, R. J. (2014). Activity profiles of professional soccer, rugby league and Australian football match play. *J Sports Sci*, 32(20), 1858-1866.
- Viitasalo, J. H. (1982). Effects of pretension on isometric force production. *Int J Sports Med*, 3, 149-152.
- Vila-Cha, C., Falla, D., & Farina, D. (2010). Motor unit behavior during submaximal contractions following six weeks of either endurance or strength training. *J Appl Physiol* (1985), 109(5), 1455-1466.
- Vollestad, N. K. (1997). Measurement of human muscle fatigue. *J Neurosci Methods*, 74(2), 219-227.

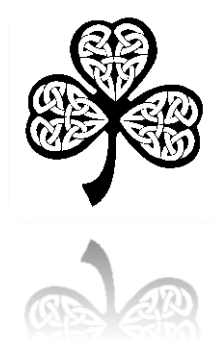
- Wadden, K. P., Button, D. C., Kibele, A., & Behm, D. G. (2012). Neuromuscular fatigue recovery following rapid and slow stretch-shortening cycle movements. *Appl Physiol Nutr Metab*, 37(3), 437-447.
- Wakeling, J. M., Pascual, S. A., Nigg, B. M., & von Tscharn, V. (2001). Surface EMG shows distinct populations of muscle activity when measured during sustained sub-maximal exercise. *Eur J Appl Physiol*, 86(1), 40-47.
- Walker, S., Davis, L., Avela, J., & Hakkinen, K. (2012). Neuromuscular fatigue during dynamic maximal strength and hypertrophic resistance loadings. *J Electromyogr Kinesiol*, 22(3), 356-362.
- Walker, S., Peltonen, J., Ahtiainen, J. P., Avela, J., & Hakkinen, K. (2009). Neuromuscular fatigue induced by an isotonic heavy-resistance loading protocol in knee extensors. *J Sports Sci*, 27(12), 1271-1279.
- Walker, S., Taipale, R. S., Nyman, K., Kraemer, W. J., & Hakkinen, K. (2011). Neuromuscular and hormonal responses to constant and variable resistance loadings. *Med Sci Sports Exerc*, 43(1), 26-33.
- Warren, G. L., Ingalls, C. P., Lowe, D. A., & Armstrong, R. B. (2002). What mechanisms contribute to the strength loss that occurs during and in the recovery from skeletal muscle injury? *J Orthop Sports Phys Ther*, 32(2), 58-64.
- Warren, G. L., Lowe, D. A., & Armstrong, R. B. (1999). Measurement tools used in the study of eccentric contraction-induced injury. *Sports Med*, 27(1), 43-59.
- West, D. W., Burd, N. A., Tang, J. E., Moore, D. R., Staples, A. W., Holwerda, A. M., Baker, S. K., & Phillips, S. M. (2010). Elevations in ostensibly anabolic hormones with resistance exercise enhance neither training-induced muscle hypertrophy nor strength of the elbow flexors. *J Appl Physiol* (1985), 108(1), 60-67.
- West, D. W., Kujbida, G. W., Moore, D. R., Atherton, P., Burd, N. A., Padzik, J. P., De Lisio, M., Tang, J. E., Parise, G., Rennie, M. J., Baker, S. K., & Phillips, S. M. (2009). Resistance exercise-induced increases in putative anabolic hormones do not enhance muscle protein synthesis or intracellular signalling in young men. *J Physiol*, 587(Pt 21), 5239-5247.



- Westcott, W. L., Winett, R. A., Anderson, E. S., Wojcik, J. R., Loud, R. L., Cleggett, E., & Glover, S. (2001). Effects of regular and slow speed resistance training on muscle strength. *J Sports Med Phys Fitness*, 41(2), 154-158.
- Westerblad, H., & Allen, D. G. (2002). Recent advances in the understanding of skeletal muscle fatigue. *Curr Opin Rheumatol*, 14(6), 648-652.
- Westerblad, H., Allen, D. G., & Lannergren, J. (2002). Muscle fatigue: lactic acid or inorganic phosphate the major cause? *News Physiol Sci*, 17, 17-21.
- Westerblad, H., Bruton, J. D., & Katz, A. (2010). Skeletal muscle: energy metabolism, fiber types, fatigue and adaptability. *Exp Cell Res*, 316(18), 3093-3099.
- Westerblad, H., Bruton, J. D., & Lannergren, J. (1997). The effect of intracellular pH on contractile function of intact, single fibres of mouse muscle declines with increasing temperature. *J Physiol*, 500 ( Pt 1), 193-204.
- Wheeler, G. D., Wall, S. R., Belcastro, A. N., & Cumming, D. C. (1984). Reduced serum testosterone and prolactin levels in male distance runners. *JAMA*, 252(4), 514-516.
- Wilkinson, S. B., Tarnopolsky, M. A., Grant, E. J., Correia, C. E., & Phillips, S. M. (2006). Hypertrophy with unilateral resistance exercise occurs without increases in endogenous anabolic hormone concentration. *Eur J Appl Physiol*, 98(6), 546-555.
- Wilson, G. J., Lyttle, A. D., Ostrowski, K. J., & Murphy, A. (1995). Assessing dynamic performance: A comparison of rate of force development tests. *J Strength Cond Res*, 9(3), 176-181.
- Willardson, J. M. (2007). The application of training to failure in periodized multiple-set resistance exercise programs. *J Strength Cond Res*, 21(2), 628-631.
- Willardson, J. M., & Burkett, L. N. (2005). A comparison of 3 different rest intervals on the exercise volume completed during a workout. *J Strength Cond Res*, 19(1), 23-26.
- Willardson, J. M., & Burkett, L. N. (2006a). The effect of rest interval length on bench press performance with heavy vs. light loads. *J Strength Cond Res*, 20(2), 396-399.

- Willardson, J. M., & Burkett, L. N. (2006b). The effect of rest interval length on the sustainability of squat and bench press repetitions. *J Strength Cond Res*, 20(2), 400-403.
- Willardson, J. M., & Burkett, L. N. (2008). The effect of different rest intervals between sets on volume components and strength gains. *J Strength Cond Res*, 22(1), 146-152.
- Willardson, J. M., Emmett, J., Oliver, J. A., & Bressel, E. (2008). Effect of short-term failure versus nonfailure training on lower body muscular endurance. *Int J Sports Physiol Perform*, 3(3), 279-293.
- Willardson, J. M., Norton, L., & Wilson, G. (2010). Training to failure and beyond in mainstream resistance exercise programs. *Strength Cond J*, 32(3), 21-29.
- Winett, R. A., & Carpinelli, R. N. (2001). Potential health-related benefits of resistance training. *Prev Med*, 33(5), 503-513.
- Wisloff, U., Castagna, C., Helgerud, J., Jones, R., & Hoff, J. (2004). Strong correlation of maximal squat strength with sprint performance and vertical jump height in elite soccer players. *Br J Sports Med*, 38(3), 285-288.
- Wolpaw, J. R., & Carp, J. S. (2006). Plasticity from muscle to brain. *Prog Neurobiol*, 78(3-5), 233-263.
- Young, W. B., & Bilby, G. E. (1993). The effect of voluntary effort to influence speed of contraction on strength, muscular power, and hypertrophy development. *J Strength Cond Res*, 7(3), 172-178.
- Zafeiridis, A., Smilios, I., Considine, R. V., & Tokmakidis, S. P. (2003). Serum leptin responses after acute resistance exercise protocols. *J Appl Physiol (1985)*, 94(2), 591-597.
- Zanchi, N. E., Lira, F. S., Seelaender, M., & Lancha-Jr, A. H. (2010). Experimental chronic low-frequency resistance training produces skeletal muscle hypertrophy in the absence of muscle damage and metabolic stress markers. *Cell Biochem Funct*, 28(3), 232-238.

# Relación de Tablas





Nº de Tabla	Título	Página
1	Esquema temporal que muestra la distribución de las sesiones de familiarización y las sesiones de evaluación para un participante representativo del estudio	91
2	Variables descriptivas de las series realizadas hasta el fallo muscular ante las 8 intensidades relativas estudiadas	93
3	Coeficiente de variación (CV) para: i) el número de repeticiones realizadas con cada intensidad relativa; y ii) el porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo número posible cuando se alcanza un determinado valor de pérdida de velocidad en una serie realizada hasta el fallo con la correspondiente intensidad relativa	95
4	Coeficientes de correlación entre el número de repeticiones realizado en cada serie hasta el fallo y varias variables mecánicas y antropométricas	96
5	Porcentaje de repeticiones realizadas con respecto al máximo número que pueden ser completadas cuando se alcanza una determinada magnitud de pérdida de velocidad en una serie realizada hasta el fallo con cargas que oscilan entre el 50 y el 70% de 1RM	98
6	Variables descriptivas de las dos series realizadas hasta el fallo muscular con el 60% 1RM	123
7	Valores obtenidos de porcentajes de repeticiones realizados y fiabilidad absoluta para cada magnitud de pérdida de VMP alcanzada en la serie hasta el fallo con el 60% 1RM	123
8	Fiabilidad de las variables mecánicas analizadas durante los test dinámicos	125
9	Fiabilidad de las variables mecánicas analizadas durante los test estáticos	125
10	Valores medios obtenidos para cada una de las variables medidas durante las activaciones dinámicas antes, inmediatamente después y a los 3, 5, 10, 15, 20 min después de terminar la serie hasta el fallo con el 60% 1RM	127
11	Valores medios obtenidos para cada una de las variables medidas durante las activaciones estáticas antes, inmediatamente después y a los 3, 5, 10, 15, 20 min después de terminar la serie hasta el fallo con el 60% 1RM	128
12	Variables descriptivas de las series realizadas hasta el fallo muscular ante las 4 intensidades relativas estudiadas en los ejercicios de <b>press de banca</b> y <b>sentadilla completa</b>	158
13	Porcentaje de repeticiones realizado con respecto al total de repeticiones posibles en la serie ante determinados porcentajes de pérdidas de velocidad en la serie en los ejercicios de <b>press de banca</b> y <b>sentadilla completa</b>	159
14	Comparación de la pérdida de VMP con la $C1m \cdot s^{-1}$ después de una serie hasta el fallo muscular con las distintas intensidades relativas utilizadas en los ejercicios de <b>press de banca</b> y <b>sentadilla completa</b>	162
15	Número de repeticiones realizado por cada grupo (GBR vs. GAR) ante cada una de las intensidades relativas utilizadas	164
16	Características físicas descriptivas de los participantes en el <b>Estudio II</b>	190
17	Configuración de los esfuerzos realizados en el <b>Estudio II</b> para el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>	192
18	Configuración de los esfuerzos realizados en el <b>Estudio II</b> para el ejercicio de <b>press de banca</b>	193
19	Fiabilidad de las variables de EMG analizadas en el <b>Estudio II</b>	198
20	Dominios de la transformada discreta de wavelet y sus rangos de frecuencias	199
21	Fiabilidad de la velocidad alcanzada a los 5, 10, 15 y 20 m durante el test de carrera en 20 m	212
22	Características descriptivas de los protocolos de entrenamiento de fuerza realizados en cada sesión para el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>	218

23	Características descriptivas de los protocolos de entrenamiento de fuerza realizados en cada sesión para el ejercicio de <b>press de banca</b>	219
24	Pérdidas de VMP con la $C1m \cdot s^{-1}$ , concentración de lactato y pérdidas de altura de salto después de cada protocolo de entrenamiento de fuerza	220
25	Cambios en las variables obtenidas durante el test de carrera en 20 m	222
26	Cambios en la actividad eléctrica muscular después de cada protocolo de entrenamiento de fuerza en el músculo <b>Recto femoral</b>	223
27	Cambios en la actividad eléctrica muscular después de cada protocolo de entrenamiento de fuerza en el músculo <b>Vasto Lateral</b>	224
28	Correlación entre el índice de esfuerzo y los cambios en las variables de EMG analizadas en los músculos RF y VL	229
29	Relación entre los cambios en las variables mecánicas y metabólicas y los cambios en variables de EMG del músculo <b>recto femoral o recto anterior</b>	232
30	Relación entre los cambios en las variables mecánicas y metabólicas y los cambios en variables de EMG del músculo <b>Vasto lateral o Vasto externo</b>	233
31	Índice o grado de esfuerzo (IE) correspondiente a distintos porcentajes de pérdida de velocidad en la sesión de entrenamiento, desde el 10 al 55%, ante distintas intensidades relativas (40-95% 1RM) determinadas por la velocidad de la primera repetición, en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>	248
32	Índice o grado de esfuerzo (IE) correspondiente a distintos porcentajes de pérdida de velocidad en la sesión de entrenamiento, desde el 10 al 60%, ante distintas intensidades relativas (40-95% 1RM) determinadas por la velocidad de la primera repetición, en el ejercicio de <b>press de banca</b>	248
33	Características físicas descriptivas de los participantes en el <b>Estudio III.1</b>	276
34	Ejemplo de cálculo de las variables $VMP_{CC}$ , $VMP_{CB}$ y $VMP_{CA}$ a partir de los datos obtenidos por uno de los participantes en el test isoinercial de cargas progresivas en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>	279
35	Resumen de las principales variables que definen el test de fatiga muscular en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>	284
36	Resumen de las principales variables que definen el test de fatiga muscular en el ejercicio de <b>press de banca</b>	286
37	Características descriptivas de los protocolos de entrenamiento de fuerza realizados en cada sesión para el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>	289
38	Características descriptivas de los protocolos de entrenamiento de fuerza realizados en cada sesión para el ejercicio de <b>press de banca</b>	291
39	Cambios en las variables de rendimiento analizadas desde el pre-test al post-test para cada grupo de entrenamiento en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>	300
40	Cambios en las variables de rendimiento analizadas desde el pre-test al post-test para cada grupo de entrenamiento en el ejercicio de <b>press de banca</b>	301
41	Cambios en las variables bioquímicas analizadas desde el pre-test al post-test para cada grupo de entrenamiento	309
42	Eficiencia del entrenamiento para cada grupo experimental en los ejercicios de <b>sentadilla completa y press de banca</b>	309
43	Características físicas descriptivas de los participantes en el <b>Estudio III.2</b>	338
44	Resumen de las principales variables que definen el test de fatiga muscular en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>	344
45	Resumen de las principales variables que definen el test de fatiga muscular en el ejercicio de <b>press de banca</b>	345
46	Características descriptivas de los protocolos de entrenamiento de fuerza realizados en cada sesión para el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>	348
47	Características descriptivas de los protocolos de entrenamiento de fuerza realizados en cada sesión para el ejercicio de <b>press de banca</b>	350

48	Cambios en las variables de rendimiento analizadas desde el pre-test al post-test para cada grupo de entrenamiento en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>	360
49	Comparaciones entre-grupos en las variables de rendimiento analizadas desde el pre-test al post-test en el ejercicio de sentadilla completa	361
50	Cambios en las variables de rendimiento analizadas desde el pre-test al post-test para cada grupo de entrenamiento en el ejercicio de <b>press de banca</b>	362
51	Comparaciones entre-grupos en las variables de rendimiento analizadas desde el pre-test al post-test en el ejercicio de <b>press de banca</b>	363
52	Cambios en las variables bioquímicas analizadas desde el pre-test al post-test para cada grupo de entrenamiento	374
53	Eficiencia del entrenamiento para cada grupo experimental	375





# Relación de Figuras





Nº de Figura	Título	Página
1	Multipower o máquina tipo <i>Smith</i> utilizada en para las evaluaciones se sentadilla, press de banca y salto con carga	87
2	Soporte regulable en altura acoplado a la guía vertical para poder colocar la barra a la altura deseada	88
3	Representación gráfica de la ejecución del ejercicio de press de banca mostrando las posiciones de inicio y fin de la fase concéntrica	89
4	Dispositivo <b>T-FORCE System</b> para la evaluación y el entrenamiento de la fuerza	90
5	Relación entre la intensidad relativa y el número máximo de repeticiones realizadas en la serie (A) y el porcentaje de pérdida de VMP (B) durante cada serie realizada hasta el fallo en el ejercicio de <b>press de banca</b> (ver el texto para más detalles). Las líneas verticales de error representan la DT	94
6	Relación entre la magnitud de pérdida de velocidad alcanzada en la serie y el porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo -fallo muscular- número de repeticiones que pueden ser completadas en el ejercicio de <b>press de banca</b> . (A) El porcentaje de repeticiones realizado cuando se alcanza un determinado valor de pérdida de velocidad en la serie (desde el 15% al 75%) fue similar para todas las cargas entre el 50% y el 70% 1RM, pero éste fue progresivamente mayor para el 75, 80 y 85% 1RM, respectivamente. (B) Para las cargas del 75, 80 y 85% 1RM, ante un mismo porcentaje de repeticiones realizado, las pérdidas de velocidad en la serie fueron inferiores (~2.5, ~5 y ~10%, respectivamente) a las obtenidas con cargas que oscilan entre el 50% y el 70% 1RM	97
7	Representación de los diferentes métodos usados para la cuantificación de la fuerza y la producción de fuerza en la unidad de tiempo a partir de la curva fuerza-tiempo. (A) El promedio de la pendiente de la curva fuerza-tiempo obtenida en diferentes intervalos de tiempo (0–50, 0–100, 0–150, 0–200 and 0–250 ms) relativos al inicio de la activaciones ( $t = 0$ s), y RFD media; (B) RFD máxima, tiempo en alcanzar la RFD máxima, el porcentaje de fuerza con respecto al máximo nivel de fuerza obtenido durante esa misma activaciones que se alcanza cuando se produce la RFD máxima, el pico máximo de fuerza, y el tiempo en alcanzar el pico máximo de fuerza	113
8	Colocación del banco sobre la plataforma dinamométrica para la realización de las evaluaciones de <b>press de banca</b>	116
9	Representación gráfica de la ejecución del test de fuerza isométrica máxima en el ejercicio de <b>press de banca</b>	118
10	Curva fuerza-tiempo de un sujeto representativo del <b>Estudio I.2</b> durante una activación estática en la que se puede apreciar la aplicación de fuerza (~200 N) previa a la activación máxima	118
11	Plataforma dinamométrica para la evaluación de la fuerza	120
12	Protocolo llevado a cabo en las sesiones en las que se evaluaba la fatiga durante y después (tests dinámico y test isométricos) de una serie realizada hasta el fallo muscular con el 60% 1RM	120
13	Relación entre la magnitud de pérdida de velocidad alcanzada en la serie y el porcentaje de repeticiones realizado con respecto al máximo -fallo muscular- número de repeticiones que puede ser completado en ambos test de máximo número de repeticiones posible con el 60% 1RM	124

14	Valores de distintas variables con respecto al valor previo al esfuerzo (100%) tras la realización de una serie hasta el fallo muscular con el 60% 1RM en distintos intervalos de tiempo, desde Post1 a Post 6 ( <b>A</b> : pico de fuerza máximo; <b>B</b> : máxima RFD; <b>C</b> : RFD producida en el intervalo de 0-75 ms; <b>D</b> : RFD producida en el intervalo de 0-100 ms), medidas durante test dinámicos e isométricos	129
15	Cambios relativos en distintas variables de RFD medidas antes, inmediatamente después del test de MNR y durante la recuperación durante activaciones dinámicas concéntricas	138
16	Ejemplo de determinación de las pérdidas de velocidad (dentro de la serie y con la $C1m \cdot s^{-1}$ ) tras la realización de un test de MNR con el 60% 1RM en el ejercicio de <b>press de banca</b>	152
17	Representación gráfica de la ejecución del ejercicio de <b>sentadilla completa</b> mostrando las posiciones de inicio y fin de la fase concéntrica	154
18	Relación entre la magnitud de pérdida de velocidad alcanzada en la serie y el porcentaje de repeticiones realizado para todas las intensidades relativas usadas (50, 60, 70 y 80% 1RM) en los ejercicios de <b>press de banca</b> y <b>sentadilla completa</b>	161
19	Relación entre la pérdida de VMP con la $C1m \cdot s^{-1}$ y la intensidad relativa ( <b>A</b> ) y la pérdida de VMP dentro de la serie ( <b>B</b> ). Diferencias significativas entre ambos ejercicios: * $p < 0.05$ ; *** $p < 0.001$ ; Diferencias significativas con respecto al 80% 1RM: # $p < 0.05$ , ### $p < 0.001$ ; Diferencias significativas con respecto al 70% 1RM: ††† $p < 0.001$	163
20	Pérdida de VMP con la $C1m \cdot s^{-1}$ después de cada uno de los test de MNR en cada uno de los grupos formados en función del número de repeticiones realizado (GBR vs. GAR) para el ejercicio de <b>press de banca (A)</b> y <b>sentadilla completa (B)</b>	164
21	Ejemplo de determinación de las pérdidas de velocidad (dentro de la serie y con la $C1m \cdot s^{-1}$ ) y salto vertical tras la realización de un protocolo de entrenamiento de fuerza donde la mejor VMP de la primera serie fue $\sim 0.98 m \cdot s^{-1}$ (60% 1RM) y la pérdida de velocidad en cada serie fue del $\sim 30\%$ [ $3 \times 0.98(30\%)$ ] en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>	195
22	Toma de muestra de sangre para la medición de la concentración de lactato	202
23	Representación gráfica de la colocación de los electrodos para el registro de la señal de EMG durante el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>	203
24	Ejecución del test de salto con contramovimiento (CMJ) mostrando la posición de inicio, la posición de máxima flexión de piernas y la posición del cuerpo durante la fase de vuelo	204
25	Ejecución del test de velocidad en 20 m mostrando la posición de partida (1 m por detrás de la distancia 0 m) y fase de aceleración	205
26	Electromiógrafo utilizado para los registros de EMG	207
27	Ejemplo de señal de EMG de los músculos RF ( <b>A</b> ) y VL ( <b>B</b> ) sincronizado con la señal de desplazamiento durante una repetición ( <b>C</b> ) para mostrar el intervalo de EMG analizado	207
28	Sistema <i>Optojump Next</i> utilizado para la medición del salto vertical (CMJ)	208
29	Sistema <i>Witty</i> utilizado para la medición de los tiempos en carrera	209
30	Sistema <i>Optojump Next</i> utilizado para la medición de los tiempos de contacto durante la carrera de 20 m	210
31	Medidor de lactato portátil Lactate Pro 2 LT-1730	211
32	Radar Stalker ATS II	211

33	Representación esquemática del diseño del <b>Estudio II (A)</b> con la descripción del protocolo seguido durante las sesiones realizadas para el ejercicio de <b>sentadilla completa (B)</b> y <b>press de banca (C)</b>	214
34	Pérdidas de VMP con la $C1m \cdot s^{-1}$ , concentración de lactato y pérdidas de altura de salto en relación con la pérdida de velocidad media obtenida en cada protocolo de entrenamiento de fuerza en los ejercicios de <b>sentadilla completa (A, B y C)</b> y <b>press de banca (D y E)</b> . Cada intensidad relativa está representada con un color diferente: Amarillo (50% 1RM); Verde (60% 1RM); Azul (70% 1RM); Rojo (80% 1RM). <sup>a</sup> Diferencias significativas entre 50% y 80% 1RM; <sup>b</sup> Diferencias significativas entre 50% y 70% 1RM; <sup>c</sup> Diferencias significativas entre 50% y 60% 1RM; <sup>d</sup> Diferencias significativas entre 60% y 80% 1RM; <sup>e</sup> Diferencias significativas entre 60% y 70% 1RM; <sup>f</sup> Diferencias significativas entre 70% y 80% 1RM	221
35	Correlaciones entre el índice de esfuerzo y <b>(A)</b> las pérdidas de VMP con la $C1m \cdot s^{-1}$ , <b>(B)</b> la pérdidas de altura de salto y <b>(C)</b> la concentración sanguínea de lactato para los PEF realizados en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b> . Cada intensidad relativa está representada con un color diferente: Amarillo (50% 1RM); Verde (60% 1RM); Azul (70% 1RM); Rojo (80% 1RM)	226
36	Correlaciones entre el índice de esfuerzo y <b>(A)</b> las pérdidas de VMP con la $C1m \cdot s^{-1}$ y <b>(B)</b> la concentración sanguínea de lactato, y correlación entre las pérdidas de VMP con la $C1m \cdot s^{-1}$ y la concentración sanguínea de lactato <b>(C)</b> para los PEF realizados en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b> . Cada intensidad relativa está representada con un color diferente: Amarillo (50% 1RM); Verde (60% 1RM); Azul (70% 1RM); Rojo (80% 1RM)	227
37	Correlaciones entre el índice de esfuerzo en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b> y los cambios en las variables medidas durante el test de carrera en 20 m ( <b>A</b> : T10; <b>B</b> : T20; <b>C</b> : TC; <b>D</b> : V5 m; <b>E</b> : V20 m). Cada intensidad relativa está representada con un color diferente: Amarillo (50% 1RM); Verde (60% 1RM); Azul (70% 1RM); Rojo (80% 1RM)	228
38	Correlaciones entre la pérdida de CMJ y <b>(A)</b> las pérdidas de VMP con la $C1m \cdot s^{-1}$ , <b>(B)</b> la concentración sanguínea de lactato y los cambios en las variables medidas durante el test de carrera en 20 m ( <b>C</b> : T20; <b>D</b> : TC; <b>E</b> : V5 m; <b>F</b> : V20 m). Cada intensidad relativa está representada con un color diferente: Amarillo (50% 1RM); Verde (60% 1RM); Azul (70% 1RM); Rojo (80% 1RM)	230
39	Extracción de la muestra de sangre para el análisis bioquímico	283
40	Representación gráfica de la colocación de los electrodos para el registro de la señal de EMG durante el ejercicio de <b>press de banca</b>	286
41	Velocidad media de entrenamiento para cada grupo ( $PV_{menor}$ y $PV_{mayor}$ ) en los ejercicios de <b>sentadilla completa</b> y <b>press de banca</b> . Las barras de error representan la DT. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a $PV30\%$ : *** $p < 0.001$	298
42	Número de repeticiones realizado en cada rango de velocidad y número de repeticiones totales completadas por cada grupo ( $PV_{menor}$ y $PV_{mayor}$ ) para los ejercicios de <b>sentadilla completa (A)</b> y <b>press de banca (B)</b> . Las barras de error representan la DT. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a $PV10\%$ : *** $p < 0.001$	299

43	Curva carga-velocidad en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b> y <b>press de banca</b> obtenida para los grupos PV <sub>menor</sub> ( <b>A y C</b> ) y grupos PV <sub>mayor</sub> ( <b>B y D</b> ) antes y después de las 8 semanas de entrenamiento. Las barras de error representan la DT. Diferencias estadísticamente significativas intra-grupo: * $p < 0.05$ ; ** $p < 0.01$ ; *** $p < 0.001$ . Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV10%: † $p < 0.05$	303
44	Cambios en la RMS ( <b>A y B</b> ), la Fmed ( <b>C y D</b> ) y la Fmax ( <b>E y F</b> ) ante distintas cargas absolutas (20 - 60 kg) en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b> para los grupos PV10% ( <b>Azul</b> ) y PV30% ( <b>Rojo</b> ). Las líneas verticales representan la DT	304
45	Cambios en la RMS ( <b>A y B</b> ), la Fmed ( <b>C y D</b> ) y la Fmax ( <b>E y F</b> ) ante distintas cargas absolutas (20 - 60 kg) en el ejercicio de <b>press de banca</b> para los grupos PV15% ( <b>Azul</b> ) y PV40% ( <b>Rojo</b> ). Las líneas verticales representan la DT	305
46	Evolución de la altura de salto y de la repetición máxima (estimada a partir de la mejor velocidad alcanzada con la carga más alta utilizada en la segunda sesión de cada semana de entrenamiento) en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b> obtenida para los grupos PV10% ( <b>azul</b> ) y PV30% ( <b>rojo</b> ). Las barras representan el <i>índice de esfuerzo</i> medio de cada semana para cada grupo de entrenamiento. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV30%: * $p < 0.05$	307
47	Evolución de la repetición máxima (estimada a partir de la mejor velocidad alcanzada con la carga más alta utilizada en la segunda sesión de cada semana de entrenamiento) en el ejercicio de <b>press de banca</b> obtenida para los grupos PV10% ( <b>azul</b> ) y PV30% ( <b>rojo</b> ). Las barras representan el <i>índice de esfuerzo</i> medio de cada semana para cada grupo de entrenamiento. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV30%: * $p < 0.05$	308
48	Relación entre la pérdida de velocidad en la serie y el porcentaje de cambio obtenido en las diferentes variables analizadas en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b> . Para la representación gráfica se han utilizado los resultados del presente estudio y los resultados mostrados por Pareja-Blanco et al. (2016b)	317
49	Relación entre la pérdida de velocidad en la serie y el porcentaje de cambio obtenido en las diferentes variables analizadas en el ejercicio de <b>press de banca</b> . Para la representación gráfica se han utilizado los resultados del presente estudio y los resultados mostrados por Pareja-Blanco et al. (2016b)	322
50	Velocidad media de entrenamiento para cada grupo (PV <sub>menor</sub> , PV <sub>media</sub> y PV <sub>mayor</sub> ) en los ejercicios de <b>sentadilla completa</b> y <b>press de banca</b> . Las barras de error representan la DT. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV <sub>mayor</sub> : *** $p < 0.001$ . Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV <sub>media</sub> : ††† $p < 0.001$	358
51	Número de repeticiones realizado en cada rango de velocidad y número de repeticiones totales completadas por cada grupo (PV <sub>menor</sub> , PV <sub>media</sub> y PV <sub>mayor</sub> ) para los ejercicios de <b>sentadilla completa</b> ( <b>A</b> ) y <b>press de banca</b> ( <b>B</b> ). Las barras de error representan la DT. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV <sub>menor</sub> : * $p < 0.05$ ; ** $p < 0.01$ ; *** $p < 0.001$ . Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV <sub>media</sub> : ††† $p < 0.001$	358

52	Curva carga-velocidad en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b> obtenida para los grupos PV10% (A), PV30% (B) y PV45% (C) antes y después de las 8 semanas de entrenamiento. Las barras de error representan la DT. Diferencias estadísticamente significativas intra-grupo: * $p < 0.05$ ; ** $p < 0.01$ ; *** $p < 0.001$ . Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV45%: † $p < 0.05$	365
53	Curva carga-velocidad en el ejercicio de <b>press de banca</b> obtenida para los grupos PV10% (A), PV30% (B) y PV45% (C) antes y después de las 8 semanas de entrenamiento. Las barras de error representan la DT. Diferencias estadísticamente significativas intra-grupo: * $p < 0.05$ ; ** $p < 0.01$ ; *** $p < 0.001$	366
54	Porcentaje de cambios en la VMP para cada una de las cargas analizadas en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b> (A) y <b>press de banca</b> (B) obtenidos para los grupos PV <sub>menor</sub> (Azul), PV <sub>media</sub> (Rojo) y PV <sub>mayor</sub> (Verde) antes y después de las 8 semanas de entrenamiento. Las barras de error representan la DT	367
55	Cambios en la RMS (A, B y C), la Fmed (D, E y F) y la Fmax (G, H e I) ante distintas cargas absolutas (30 - 80 kg) en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b> para los grupos PV10% (Azul), PV30% (Rojo) y PV45% (Verde). Las líneas verticales representan la DT	369
56	Cambios en la RMS (A, B y C), la Fmed (D, E y F) y la Fmax (G, H e I) ante distintas cargas absolutas (20 - 60 kg) en el ejercicio de <b>press de banca</b> para los grupos PV10% (Azul), PV30% (Rojo) y PV45% (Verde). Las líneas verticales representan la DT	370
57	Evolución de la altura de salto (CMJ) y de la repetición máxima (estimada a partir de la mejor velocidad alcanzada con la carga más alta utilizada en la segunda sesión de cada semana de entrenamiento) en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b> obtenida para los grupos PV10% (azul), PV30% (rojo) y PV45% (verde). Las barras representan el <i>índice de esfuerzo</i> medio de cada semana para cada grupo de entrenamiento. Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV30%: ** $p < 0.01$ ; *** $p < 0.001$ . Diferencias estadísticamente significativas con respecto a PV45%: † $p < 0.05$ ; †† $p < 0.01$	372
58	Evolución de la repetición máxima (estimada a partir de la mejor velocidad alcanzada con la carga más alta utilizada en la segunda sesión de cada semana de entrenamiento) en el ejercicio de <b>press de banca</b> obtenida para los grupos PV10% (azul), PV30% (rojo) y PV45% (verde). Las barras representan el <i>índice de esfuerzo</i> medio de cada semana para cada grupo de entrenamiento	373
59	Respuesta individual de cada uno de los participantes de los tres grupos experimentales en la variable <b>CMJ</b> : PV10% (Azul); PV30% (Rojo); PV45% (Verde)	381
60	Respuesta individual de cada uno de los participantes de los tres grupos experimentales en la variable <b>T20</b> : PV10% (Azul); PV30% (Rojo); PV45% (Verde)	383
61	Relación entre la pérdida de velocidad en la serie y el porcentaje de cambio obtenido en las diferentes variables analizadas en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b> después de dos programas de entrenamiento con distinto rango de intensidades: 55 - 70% 1RM (Azul) y 70 - 85% 1RM (Rojo). Para estas representaciones gráficas se han utilizado los resultados del <b>Estudio III.1</b> , <b>Estudio III.2</b> y los resultados mostrados por Pareja-Blanco et al. (2016b)	386

62	Relación entre la pérdida de velocidad en la serie y el porcentaje de cambio obtenido en las diferentes variables analizadas en el ejercicio de <b>press de banca</b> después de dos programas de entrenamiento con distinto rango de intensidades: 55 - 70% 1RM ( <b>Azul</b> ) y 70 - 85% 1RM ( <b>Rojo</b> ). Para estas relaciones se han utilizado los resultados del <b>Estudio III.1, Estudio III.2</b> y los resultados mostrados por Pareja-Blanco et al. (2016b)	389
----	--	-----



# Glosario de Acrónimos





Acrónimo	Significado
1RM	Una repetición máxima
%Fza-RFD	Porcentaje de fuerza aplicada cuando se alcanza la RFD máxima
1RM <sub>est</sub>	Una repetición máxima estimada
ADP	Adenosín difosfato
AMP	Adenosín monofosfato
ATP	Adenosín trifosfato
C1m·s <sup>-1</sup>	Velocidad ante la carga que los sujetos podían desplazar a ~1m·s <sup>-1</sup>
Ca <sup>2+</sup>	Calcio
CCI	Coeficiente de correlación intraclase
CEA	Ciclo estiramiento - acortamiento
CK	Creatín kinasa
CMJ	Salto vertical con contramovimiento, <i>countermovement jump</i>
Cociente T/C	Cociente testosterona - cortisol
Cr	Creatina
CV	Coeficiente de variación
DI	Índice de Dimitrov, del inglés <i>Dimitrov Index</i>
DT	Desviación típica
EMG	Electromiografía
Fmax	Frecuencia máxima
Fmean	Frecuencia media, del inglés <i>mean frequency</i>
Fmed	Frecuencia mediana
Fmed	Frecuencia mediana, del inglés <i>median frequency</i>
Fmedia	Frecuencia media
GAR	Grupo de alto número de repeticiones
GBR	Grupo de bajo número de repeticiones
GH	Hormona de crecimiento, del inglés <i>growth hormone</i>
H <sup>+</sup>	Protones
IC	Intervalo de confianza
ID	Índice de Dimitrov
IE	Índice de esfuerzo
iEMG	Integral de la electromiografía
IGF-1	Somatomedina-c, del inglés <i>insulin growth factor</i>
IMP	Ionosín monofosfato
kg	Kilogramo

<b>L1m·s<sup>-1</sup></b>	Carga que los sujetos podían desplazar a una VMP de ~1m·s <sup>-1</sup> , del inglés <i>load that elicits a ~1m·s<sup>-1</sup> MPV</i>
<b>LAC</b>	Lactatemia
<b>LB</b>	Longitud del brazo
<b>m</b>	Metro
<b>MAV</b>	promedio de la tensión media, <i>mean average voltage</i>
<b>MC</b>	Masa corporal
<b>MNR</b>	Test de máximo número de repeticiones posible
<b>MPV</b>	Velocidad media propulsiva, del inglés <i>mean propulsive velocity</i>
<b>MRFD</b>	Máxima producción de fuerza en la unidad de tiempo
<b>PB</b>	Press de banca
<b>PCr</b>	Fosfocreatina
<b>PEC</b>	Pectoral
<b>PEF</b>	Protocolo de entrenamiento de fuerza
<b>PF</b>	Pico de fuerza
<b>Pi</b>	Fosfato inorgánico
<b>PMEC</b>	Potenciales motores evocados cervicomedularmente
<b>Post</b>	Post-ejercicio o Post-entrenamiento
<b>PR</b>	Número de repeticiones que se podían realizar
<b>Pre</b>	Pre-ejercicio o Pre-entrenamiento
<b>PV</b>	Pérdida de velocidad
<b>PV10%</b>	Grupo que entrenó alcanzando una pérdida de velocidad en la serie del 10% en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>
<b>PV15%</b>	Grupo que entrenó alcanzando una pérdida de velocidad en la serie del 15% en el ejercicio de <b>press de banca</b>
<b>PV20%</b>	Grupo que entrenó alcanzando una pérdida de velocidad en la serie del 20% en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>
<b>PV25%</b>	Grupo que entrenó alcanzando una pérdida de velocidad en la serie del 25% en el ejercicio de <b>press de banca</b>
<b>PV30%</b>	Grupo que entrenó alcanzando una pérdida de velocidad en la serie del 30% en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>
<b>PV40%</b>	Grupo que entrenó alcanzando una pérdida de velocidad en la serie del 40% en el ejercicio de <b>press de banca</b>
<b>PV45%</b>	Grupo que entrenó alcanzando una pérdida de velocidad en la serie del 45% en el ejercicio de <b>sentadilla completa</b>
<b>PV55%</b>	Grupo que entrenó alcanzando una pérdida de velocidad en la serie del 55% en el ejercicio de <b>press de banca</b>
<b>PV<sub>mayor</sub></b>	Grupo que entrenó alcanzando una mayor pérdida de velocidad en la serie en los ejercicios de <b>sentadilla completa</b> y <b>press de banca</b>
<b>PV<sub>media</sub></b>	Grupo que entrenó alcanzando una pérdida de velocidad en la serie media en los ejercicios de <b>sentadilla completa</b> y <b>press de banca</b>
<b>PV<sub>menor</sub></b>	Grupo que entrenó alcanzando una menor pérdida de velocidad en la serie en los ejercicios de <b>sentadilla completa</b> y <b>press de banca</b>

<b>Rep</b>	Repeticiones realizadas
<b>RF</b>	Recto femoral
<b>RFD</b>	Producción de fuerza en la unidad de tiempo, <i>rate of force development</i>
<b>RFD<sub>0-100</sub></b>	Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 100 ms
<b>RFD<sub>0-200</sub></b>	Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 200 ms
<b>RFD<sub>0-25</sub></b>	Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 25 ms
<b>RFD<sub>0-300</sub></b>	Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 300 ms
<b>RFD<sub>0-400</sub></b>	Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 400 ms
<b>RFD<sub>0-50</sub></b>	Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 50 ms
<b>RFD<sub>0-500</sub></b>	Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 500 ms
<b>RFD<sub>0-75</sub></b>	Pendiente media de la curva fuerza - tiempo en el intervalo de 0 - 75 ms
<b>RFD<sub>media</sub></b>	RFD media
<b>RH</b>	Reflejo de Hoffman
<b>RMS</b>	Root mean square
<b>rRFD</b>	RFD relativa
<b>RS</b>	Retículo sarcoplásmico
<b>s</b>	Segundo
<b>S</b>	Series
<b>SQ</b>	Sentadilla completa
<b>T10</b>	Tiempo en recorrer 10m
<b>T20</b>	Tiempo en recorrer 20m
<b>TC</b>	Tiempo de contacto
<b>TDW</b>	Transformada discreta de Wavelet
<b>TMRFD</b>	Tiempo en alcanzar la RFD máxima
<b>TPF</b>	Tiempo en alcanzar el pico de fuerza
<b>TRI</b>	Tríceps
<b>V10m</b>	Velocidad alcanzada a los 10m
<b>V15m</b>	Velocidad alcanzada a los 15m
<b>V20m</b>	Velocidad alcanzada a los 20m
<b>V5m</b>	Velocidad alcanzada a los 5m
<b>VL</b>	Vasto lateral
<b>VM</b>	Vasto medial
<b>V<sub>máx</sub></b>	Velocidad máxima
<b>VMP</b>	Velocidad Media Propulsiva
<b>VMP<sub>mejor</sub></b>	Velocidad media propulsiva de la mejor (normalmente la primera) repetición de la serie

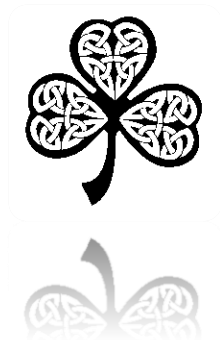
---

<b>VMP<sub>RM</sub></b>	Velocidad media propulsiva a la que se consigue la repetición máxima
<b>VMP<sub>última</sub></b>	Velocidad media propulsiva de la última repetición de la serie
<b>WDT</b>	Transformada discreta de wavelet, del inglés wavelet discrete transform

---

# **ANEXO I**

## **Consentimiento Informado**







---

**ESTUDIO I**  
**DECLARACIÓN DE CONSENTIMIENTO INFORMADO**

Yo, D. \_\_\_\_\_, mayor de edad, con D.N.I.  
\_\_\_\_\_, domicilio en \_\_\_\_\_ y N°  
de Teléfono \_\_\_\_\_

DECLARO:

Que he sido informado por el Dr. Juan José González Badillo sobre las posibles consecuencias de la realización de los tests físicos de press de banca y sentadilla completa, así como de los riesgos potenciales y molestias que podrían derivarse de los mismos, a la vez que he podido realizar todas las preguntas que he considerado necesarias, respondiéndome a todas ellas de manera comprensible para mí.

También me ha informado de mi derecho a rechazar el tratamiento o revocar este consentimiento.

Por lo tanto, CONSIENTO en someterme a los protocolos indicados.

Si mi participación puede ser de utilidad científica y para tal fin se publican artículos científicos, autorizo la utilización de los datos reportados durante mis pruebas siempre y cuando se me garantice el más absoluto respeto a mi intimidad y anonimato.

Firma del sujeto

Firma del responsable del estudio

En Sevilla, a \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_

## ESTUDIO II

### DECLARACIÓN DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

Yo, D. \_\_\_\_\_, mayor de edad, con D.N.I. \_\_\_\_\_, domicilio en \_\_\_\_\_ y N° de Teléfono \_\_\_\_\_, declaro que (marcar con una X en la casilla ☐):

- ☐ Me ofrezco a participar como voluntario en este *Proyecto de Investigación*, habiéndome sido explicado el propósito, naturaleza, beneficios y posibles riesgos de tomar parte en el mismo.
- ☐ Sé que el Dr. D. **Juan José González Badillo**, Catedrático de Universidad, en la Universidad Pablo de Olavide (UPO) de Sevilla es el Investigador Principal de este *Proyecto* y supervisa su realización, y que en el mismo también participa el doctor en Medicina y Catedrático de Universidad, Dr. D. **Juan Ribas Serna**
- ☐ He decidido colaborar voluntariamente en este *Proyecto*.
- ☐ Sé que, si así lo deseo, puedo dejar de colaborar en cualquier momento sin ningún problema.
- ☐ Estoy de acuerdo en que mis datos se guarden por el Investigador Principal, de forma confidencial, para su posterior análisis.
- ☐ Sé que los resultados de esta investigación, en caso de publicarse, no estarán referidos a mi persona, respetándose la confidencialidad de los mismos y mi intimidad.
- ☐ Soy consciente de las molestias y riesgos potenciales que podrían derivarse de la realización de las pruebas.
- ☐ Informaré al experimentador de cualquier malestar que sienta.
- ☐ He tenido la oportunidad de hacer las preguntas que he creído conveniente.
- ☐ He leído esta información, la considero suficientemente clara, y estoy de acuerdo en participar en el *Proyecto*.
- ☐ Se me ha dado una copia de esta *Declaración de Consentimiento*.

Por tanto, y estando conforme con todo lo anterior, **otorgo mi consentimiento** firmando la presente *Declaración de Consentimiento Informado*:

Firma del sujeto

Firma del responsable del estudio

En Sevilla, a \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_

### ESTUDIO III

#### DECLARACIÓN DE CONSENTIMIENTO INFORMADO

Yo, D. \_\_\_\_\_, mayor de edad, con D.N.I. \_\_\_\_\_, domicilio en \_\_\_\_\_ y N° de Teléfono \_\_\_\_\_, declaro que (marcar con una X en la casilla ☐):

- ☐ Me ofrezco a participar como voluntario en este *Proyecto de Investigación*, habiéndome sido explicado el propósito, naturaleza, beneficios y posibles riesgos de tomar parte en el mismo.
- ☐ Sé que el Dr. D. **Juan José González Badillo**, Catedrático de Universidad, en la Universidad Pablo de Olavide (UPO) de Sevilla es el Investigador Principal de este *Proyecto* y supervisa su realización, y que en el mismo también participa el doctor en Medicina y Catedrático de Universidad, Dr. D. **Juan Ribas Serna**
- ☐ He decidido colaborar voluntariamente en este *Proyecto*.
- ☐ Sé que, si así lo deseo, puedo dejar de colaborar en cualquier momento sin ningún problema.
- ☐ Sé que se mantendrá en secreto mi identidad, que se identificará mi sangre con un número único y que dichas muestras de sangre serán destruidas antes de 2019.
- ☐ Estoy de acuerdo en que mis datos se guarden por el Investigador Principal, de forma confidencial, para su posterior análisis.
- ☐ Sé que los resultados de esta investigación, en caso de publicarse, no estarán referidos a mi persona, respetándose la confidencialidad de los mismos y mi intimidad.
- ☐ Soy consciente de las molestias y riesgos potenciales que podrían derivarse de la realización de las pruebas.
- ☐ He tenido la oportunidad de hacer las preguntas que he creído conveniente.
- ☐ He leído esta información, la considero suficientemente clara, y estoy de acuerdo en participar en el *Proyecto*.
- ☐ Se me ha dado una copia de esta *Declaración de Consentimiento*.

Por tanto, y estando conforme con todo lo anterior, **otorgo mi consentimiento** firmando la presente *Declaración de Consentimiento Informado*:

Firma del sujeto

Firma del responsable del estudio

En Sevilla, a \_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 20\_\_



# **ANEXO II**

## **Publicaciones Científicas y Divulgación de los Resultados**





# Velocity Loss as a Variable for Monitoring Resistance Exercise

## Authors

Juan José González-Badillo<sup>1</sup>, Juan Manuel Yañez-García<sup>1</sup>,  
Ricardo Mora-Custodio<sup>1</sup>, David Rodríguez-Rosell<sup>1</sup>

## Affiliations

1 Centro de Investigación en Rendimiento Físico y Deportivo,  
Universidad Pablo de Olavide, Seville, Spain

## Key words

velocity-based resistance training, strength training, bench press,  
exercise prescription, muscle failure

accepted after revision 24.10.2016

## Bibliography

DOI <http://dx.doi.org/10.1055/s-0042-120324>

Published online: 2017 | Int J Sports Med

© Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York

ISSN 0172-4622

## Correspondence

David Rodríguez-Rosell

Centro de Investigación en Rendimiento Físico y Deportivo  
Universidad Pablo de Olavide

Ctra. de Utrera, km 1

41013 Seville

Spain

Tel.: +34/653/121 522, Fax: +34/954/348 659

[davidrodriguezrosell@gmail.com](mailto:davidrodriguezrosell@gmail.com)

## ABSTRACT

This study aimed to analyze: 1) the pattern of repetition velocity decline during a single set to failure against different submaximal loads (50–85 % 1RM) in the bench press exercise; and 2) the reliability of the percentage of performed repetitions, with respect to the maximum possible number that can be completed, when different magnitudes of velocity loss have been reached within each set. Twenty-two men performed 8 tests of maximum number of repetitions (MNR) against loads of 50–55–60–65–70–75–80–85 % 1RM, in random order, every 6–7 days. Another 28 men performed 2 separate MNR tests against 60 % 1RM. A very close relationship was found between the relative loss of velocity in a set and the percentage of performed repetitions. This relationship was very similar for all loads, but particularly for 50–70 % 1RM, even though the number of repetitions completed at each load was significantly different. Moreover, the percentage of performed repetitions for a given velocity loss showed a high absolute reliability. Equations to predict the percentage of performed repetitions from relative velocity loss are provided. By monitoring repetition velocity and using these equations, one can estimate, with considerable precision, how many repetitions are left in reserve in a bench press exercise set.

## Introduction

Resistance training (RT) is recognized as an effective method for improving athletic performance because it typically results in increases in muscle strength and hypertrophy, power output, speed, and local muscular endurance [16]. However, one of the main problems faced by coaches, strength and conditioning professionals and researchers is the issue of how to objectively quantify and monitor the actual training load undertaken by athletes in order to maximize performance [11]. Although several acute variables have been described for the design of RT programs [3, 16], it appears that exercise intensity and volume are the two most critical factors in determining the type and extent of the resulting neuromuscular adaptations [3, 7, 8, 27].

Exercise intensity during RT has been traditionally identified with relative load (percentage of one-repetition maximum, %1RM) or with the maximal load that can be lifted a given number of repetitions in each set (e. g., 5RM, 10RM, 15 RM) [7, 8, 11, 16]. However, these methods appear to have some potential disadvantages [8, 11]. As an alternative, recent research has examined the possibility of using movement velocity as an indicator of relative load during resistance exercise [11, 17, 19, 23, 24]. Close relationships between movement velocity and %1RM have been found for exercises such as the bench press (BP), prone bench pull and squat [11, 17, 24],

which makes it possible to determine with considerable precision the %1RM that is being used as soon as the first repetition of a set is performed with maximal voluntary velocity [11]. Such findings open up the possibility of monitoring, in real time, the actual load (%1RM) being used by measuring repetition velocity during RT, thus allowing to determine whether the proposed load (kg) truly represents the %1RM that was intended for each session.

On the other hand, training volume is generally determined from the total number of sets and repetitions performed during a training session [3, 13, 16]. Thus, when training volume is prescribed, the vast majority of studies use a specific number of repetitions to complete in each exercise set for all participants. However, the maximal number of repetitions that can be completed against a given relative load has been found to present a large variability between individuals [22, 26, 28]. Therefore, if during a training session all participants perform the same number of repetitions per set against the same relative load (e. g., 70 % 1RM), it is possible that they are exerting a different level of effort (i. e., the number of repetitions left in reserve in each set may vary considerably between individuals). These considerations suggest it is necessary to find better ways to objectively monitor training volume during RT. Accordingly, rather than performing a fixed, predetermined, number of repetitions, it seems more appropriate to stop or termi-

nate each training set as soon as a certain level of neuromuscular fatigue is detected (which, in turn, will depend on the specific goal being pursued) [19, 23]. During RT in isoinertial conditions, and assuming every repetition is performed with maximal voluntary effort, an unintentional decrease in force, velocity and hence power output is observed as fatigue develops and the number of repetitions approaches failure [15, 19, 23]. Recent research has shown that monitoring repetition velocity is an objective, practical and non-invasive indicator of the acute metabolic stress, hormonal response and mechanical fatigue induced by RT [10, 18–20, 23]. Repetition velocity has shown a very similar pattern of decrease during a single set to failure for loads ranging from 60 % to 75 % [15]. However, to our knowledge, the question of how many repetitions remain undone (left in reserve) in an exercise set when a given magnitude of velocity loss is reached (e. g., 20, 30 or 40 % reduction in repetition velocity) has not yet been investigated.

Therefore, in the context of a velocity-based resistance training approach [19, 23], two separate studies were undertaken. The main purpose of *Study I* was to analyze and compare the pattern of repetition velocity decline during a single set to failure in the BP exercise against 8 different submaximal loads (50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 and 85 % 1RM). *Study II* was a complementary study that aimed to analyze the reliability of the percentage of performed repetitions with respect to the maximum, to failure, number that can be completed for different magnitudes of velocity loss within a set to failure against a load of 60 % 1RM in the BP.

## Methods

### Participants

A group of 22 (mean  $\pm$  SD: age  $24.6 \pm 3.6$  years; height  $1.76 \pm 0.06$  m; body mass  $75.8 \pm 7.2$  kg) young healthy men volunteered to participate in *Study I*. Their estimated one-repetition maximum ( $1RM_{est}$ ) in the BP exercise was  $80.5 \pm 10.8$  kg ( $1.05 \pm 0.11$  normalized per kg of body mass). An additional group of 28 men ( $24.5 \pm 2.9$  years,  $1.77 \pm 0.07$  m,  $75.5 \pm 8.1$  kg) participated in *Study II*. In this case, their  $1RM_{est}$  was  $82.6 \pm 13.8$  kg ( $1.07 \pm 0.20$  normalized per kg of body mass). All participants were physically active sport science students with at least 8 months of recreational RT experience in the BP exercise. No physical limitations, health problems or musculoskeletal injuries that could affect testing were reported. None of the participants were taking drugs, medications or substances expected to affect physical performance or hormonal balance. The present investigation met the ethical standards of this journal [12] and was approved by the Research Ethics Committee of Pablo de Olavide University. After being informed of the purpose and experimental procedures, the participants signed a written informed consent form prior to participation.

### Study design

#### Familiarization and preliminary measures

In the preceding 2 weeks of each study (I and II), four preliminary familiarization sessions were undertaken for the purpose of emphasizing proper execution technique in the BP exercise. Several practice sets with different loads, with each repetition performed at maximal intended velocity, were carried out while receiving immediate velocity feedback from the measuring system and verbal

cues from a trained researcher. In the last familiarization session, individual load-velocity relationships and  $1RM_{est}$  strength in the BP exercise were determined using a progressive loading test (described later in detail). Anthropometric assessments and medical examinations were also conducted during these sessions. Height and body mass were determined using a medical stadiometer and scale (Seca 710, Seca Ltd., Hamburg, Germany) with the participants in a morning fasting state and wearing only underclothes. Arm length was measured while the participants were standing upright, with feet shoulder-width apart, and arms and fingers outstretched. The measurement was made on the right side from the lateral edge of the acromion to the tip of the middle finger using an inextensible measuring tape (Lufkin Ultralok, Baltimore, Maryland, USA).

### Study I

A cross-sectional research design was used to analyze the magnitude of percent velocity loss incurred during a single set to failure against 8 different submaximal loads (50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 and 85 % 1RM) in the BP exercise. These 8 sessions were performed on different days, in random order for each participant, and were separated by a time period of 6–7 days. During each session, participants performed a test of maximum number of repetitions to failure (MNR test) against the corresponding load. Relative loads were determined from the load-velocity relationship for the BP because it has been shown that there is a very close relationship between %1RM and mean propulsive velocity (MPV) for this exercise [11, 24]. Thus, a target MPV to be attained in the first (usually the fastest) repetition of the set in each session was used as an estimation of %1RM, as follows:  $\sim 0.93 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (50 % 1RM),  $\sim 0.86 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (55 % 1RM),  $\sim 0.79 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (60 % 1RM),  $\sim 0.71 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (65 % 1RM),  $\sim 0.62 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (70 % 1RM),  $\sim 0.54 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (75 % 1RM),  $\sim 0.47 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (80 % 1RM), and  $\sim 0.39 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  (85 % 1RM) [9, 11]. The absolute load (kg) for each participant was individually adjusted to match the velocity associated ( $\pm 0.02 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) with the %1RM intended for each session.

### Study II

Participants performed an MNR test against a 60 % 1RM load ( $\sim 0.79 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) on 2 different sessions, separated by 6–7 days.

For both studies, sessions were performed at the same time of day ( $\pm 1$  h) for each participant and under similar environmental conditions ( $\sim 20$ – $22^\circ\text{C}$  and  $\sim 55$ – $65\%$  humidity). In addition, participants were required to refrain from any type of RT during the 2 days preceding each session. The same standardized warm-up protocol was strictly followed by all participants for all testing sessions. This warm-up consisted of 5 min of joint mobilization and gentle stretching exercises, followed by 3 to 4 sets with progressive loads (3 min rests) up to the corresponding target load.

### Testing procedures

#### Isoinertial progressive loading test in the BP exercise

Testing was performed using a Smith machine. Participants laid supine on a flat bench, with their feet resting flat on the floor and hands placed on the bar slightly wider (2–3 cm) than shoulder width. The position on the bench was carefully adjusted so that the vertical projection of the bar corresponded with each participant's



intermammary line. The individual position on the bench as well as grip widths were measured so that they could be reproduced on every lift. Participants were not allowed to bounce the bar off their chests or raise the shoulders or trunk off the bench. Two telescopic bar holders with a precision scale were placed at the left and right sides of the Smith machine in order to: (i) precisely replicate the individual eccentric range of movement between trials; and (ii) impose a pause or delay between the eccentric and concentric phases of the BP exercise. The bar holders were positioned so that the bar stopped ~1 cm above each participant's chest. After lowering the bar at a controlled mean eccentric velocity ( $\sim 0.30\text{--}0.50\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), participants stopped for ~1.5 s at the bar holders (momentarily releasing the weight but keeping contact with the bar), and thereafter they performed a purely concentric push at maximal intended velocity. This momentary pause between phases was imposed in order to minimize the contribution of the rebound effect and allow for more reliable, consistent measures [17]. Each participant was carefully instructed to always perform the concentric phase of each repetition in an explosive manner, exploding the bar off the chest as fast as possible upon hearing the 'go!' command from a researcher. Warm-up consisted of 5 min of joint mobilization exercises, followed by 2 sets of 8 and 6 repetitions (3 min rest) with loads of 20 and 30 kg, respectively. The initial load was set at 20 kg for all participants and was gradually increased in 10 kg increments. The test ended for each participant when the attained concentric MPV was lower than  $0.35\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , which corresponds to ~88 % 1RM [11, 24]. During the test, 3 repetitions were executed for light ( $\text{MPV} > 0.95\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), 2 for medium ( $0.95\text{ m}\cdot\text{s}^{-1} > \text{MPV} > 0.55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), and only one for the heaviest ( $\text{MPV} < 0.55\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) loads. Inter-set rests ranged from 2 (light loads) to 4 min (heavy loads). The  $1\text{RM}_{\text{est}}$  was calculated for each individual from the MPV attained against the heaviest load (kg) lifted in the progressive loading test, as follows:  $(100 \cdot \text{load}) / (8.4326 \cdot \text{MPV}^2) - (73.501 \cdot \text{MPV}) + 112.33$  [11].

#### Tests of maximum number of repetitions to failure

Before starting each set to failure (50–85 % 1RM, in 5 % increments), adjustments in the load (kg) to be used were made when needed so that the velocity of the first repetition matched the specified target MPV corresponding to each load (see the above description of *Study I*). During each test, the participants were required to move the bar as fast as possible during the concentric phase of each repetition, until reaching muscle failure. As done for the isoinertial progressive loading test, participants were required to perform the eccentric phase of each repetition in a controlled manner, stop at the bar holders for ~1.5 s, and then explode the bar off the chest as fast as possible upon hearing a command.

#### Measurement equipment and data acquisition

A Smith machine (Multipower Fitness Line, Peroga, Spain) that ensures a smooth vertical displacement of the bar along a fixed pathway was used for all sessions. A cable-extension linear velocity transducer (T-Force Dynamic Measurement System, Ergotech, Murcia, Spain) was used to measure bar velocity. Instantaneous velocity was sampled at 1000 Hz and smoothed using a 4<sup>th</sup> order low-pass Butterworth filter with no phase shift and 10 Hz cutoff frequency. The system's software automatically calculated the relevant kinematics of every repetition, provided auditory and visual veloc-

ity feedback in real time and stored data on disk for analysis. The reliability of this system has been reported elsewhere [23].

#### Velocity measures

Several velocity outcome measures were used as performance variables in this study: 1) mean propulsive velocity (MPV): average of the bar velocity values of the propulsive phase, defined as that portion of the concentric action during which the measured acceleration (*a*) is greater than acceleration due to gravity, i. e.,  $a \geq -9.81\text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$  [25]; 2) MPV of the fastest (usually first) repetition in the set ( $\text{MPV}_{\text{BEST}}$ ); 3) MPV of the last repetition in the set ( $\text{MPV}_{\text{LAST}}$ ); and 4) MPV loss over each exercise set, defined as:  $100 \cdot (\text{MPV}_{\text{LAST}} - \text{MPV}_{\text{BEST}}) / \text{MPV}_{\text{BEST}}$ .

#### Statistical analysis

Standard statistical methods were used for the calculation of mean, standard deviation (SD), coefficient of variation (CV) and Pearson's correlation coefficients (*r*). Significance was accepted at  $P \leq 0.05$ . All analyses were performed using SPSS software version 17.0 (SPSS, Chicago, IL).

#### Study I

The Shapiro-Wilk test was applied to determine the nature of the data distribution. Differences in the variables analyzed between the 8 loading magnitudes used (50–85 %, in 5 % increments) were assessed using a one-way ANOVA with repeated-measures. Bonferroni post hoc procedures were performed to locate the pairwise differences between the means. Relationships between variables were studied by fitting 2nd order polynomials to the data.

#### Study II

A paired t-test was used to detect differences in the percentage of completed repetitions with respect to the maximum possible number between the 2 MNR tests at 60 % 1RM for each percentage of velocity loss incurred in the set. Absolute reliability was reported for the percentage of repetitions completed at each percentage of velocity loss using the standard error of measurement (SEM). The SEM values were expressed as a percentage of their respective means through the CV [1]. Previous reliability studies [2, 4] have reported biomechanical variables with CVs in the vicinity of 10 % as reliable. As a result, a CV of  $\leq 10\%$  was set as the criterion to declare a variable as reliable.

### Results

#### Study I

► **Table 1** summarizes the pattern of repetition velocity decline observed for the set to failure performed against each of the 8 loads under study. No significant differences were found between the expected or targeted MVP values and the fastest MPV values ( $\text{MPV}_{\text{BEST}}$ ) of each set for any of the loads used. Average MPVs of the last repetition of each set ( $\text{MPV}_{\text{LAST}}$ ) were very similar for all the loads used (► **Table 1**). As loading magnitude increased, both the number of performed repetitions ( $R^2 = 0.998$ ) and the magnitude of MPV loss ( $R^2 = 0.969$ ) progressively decreased (► **Table 1**; ► **Fig. 1**). The number of repetitions performed against each load showed a large inter-individual variability (CV: 17.3–23.5 %; ► **Table 2**), and

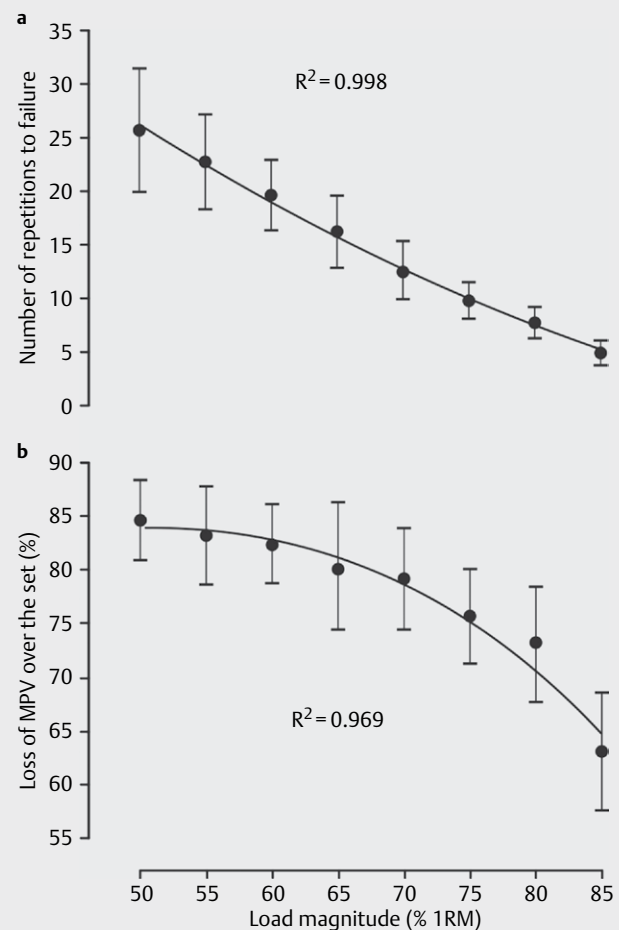
► **Table 1** Study I. Descriptive variables for the exercise sets to failure performed against the 8 loading magnitudes under study.

Load (% 1RM)	MPV <sub>BEST</sub> (m · s <sup>-1</sup> )	MPV <sub>LAST</sub> (m · s <sup>-1</sup> )	Velocity loss (%)	Rep	Load (kg)
50% (~0.93 m · s <sup>-1</sup> )	0.93 ± 0.01 (0.91–0.94)	0.14 ± 0.03 (0.09–0.22)	84.7 ± 3.7 <sup>c,d,e,f</sup> (76.1–90.5)	25.7 ± 5.8 <sup>a,b,c,d,e,f</sup> (19–40)	37.7 ± 5.2 <sup>b,c,d,e</sup> (27.5–45.0)
55% (~0.86 m · s <sup>-1</sup> )	0.86 ± 0.01 (0.84–0.88)	0.14 ± 0.04 (0.08–0.22)	83.2 ± 4.6 <sup>d,e,f</sup> (74.4–90.1)	22.7 ± 4.4 <sup>b,c,d,e,f</sup> (16–32)	40.9 ± 7.5 <sup>c,d,e</sup> (29.0–55.0)
60% (~0.79 m · s <sup>-1</sup> )	0.79 ± 0.01 (0.77–0.81)	0.13 ± 0.02 (0.09–0.19)	82.5 ± 3.1 <sup>d,e,f</sup> (76.3–88.1)	19.6 ± 3.4 <sup>c,d,e,f</sup> (15–26)	44.3 ± 6.7 <sup>c,d,e</sup> (30.0–54.0)
65% (~0.71 m · s <sup>-1</sup> )	0.71 ± 0.01 (0.69–0.73)	0.14 ± 0.04 (0.07–0.25)	80.4 ± 5.9 <sup>d,e,f</sup> (66.1–90.1)	16.2 ± 3.4 <sup>d,e,f</sup> (12–22)	46.8 ± 11.9 <sup>d,e</sup> (34.5–61.0)
70% (~0.62 m · s <sup>-1</sup> )	0.62 ± 0.01 (0.60–0.64)	0.13 ± 0.03 (0.06–0.18)	79.2 ± 4.7 <sup>e,f</sup> (70.5–90.3)	12.6 ± 2.7 <sup>e,f</sup> (9–19)	54.1 ± 7.7 <sup>e</sup> (34.5–65.0)
75% (~0.54 m · s <sup>-1</sup> )	0.54 ± 0.01 (0.52–0.56)	0.13 ± 0.02 (0.08–0.19)	75.7 ± 4.4 <sup>f</sup> (65.6–84.0)	9.8 ± 1.7 <sup>f</sup> (7–13)	57.5 ± 13.8 (39.0–72.5)
80% (~0.47 m · s <sup>-1</sup> )	0.47 ± 0.01 (0.45–0.49)	0.12 ± 0.02 (0.08–0.16)	73.6 ± 5.3 <sup>f</sup> (65.9–82.9)	7.7 ± 1.5 (5–10)	63.0 ± 7.6 (44.0–75.0)
85% (~0.39 m · s <sup>-1</sup> )	0.39 ± 0.01 (0.37–0.41)	0.14 ± 0.02 (0.11–0.18)	63.9 ± 5.1 (54.8–73.2)	4.9 ± 1.2 (4–8)	68.3 ± 10.4 (48.0–88.0)
Data are mean ± SD (range)					
Rep: number of completed repetitions in the set; MPV <sub>BEST</sub> : mean propulsive velocity of the fastest (usually first) repetition in the set; MPV <sub>LAST</sub> : mean propulsive velocity of the last repetition in the set					
Statistically significant differences with respect to: <sup>a</sup> 60% 1RM; <sup>b</sup> 65% 1RM; <sup>c</sup> 70% 1RM; <sup>d</sup> 75% 1RM; <sup>e</sup> 80% 1RM; <sup>f</sup> 85% 1RM					

showed no relationship to either anthropometric (body mass, height, arm length) or mechanical variables (MPV<sub>BEST</sub>, MPV<sub>LAST</sub>, loss of MPV over the set, 1RM<sub>est</sub> and 1RM<sub>est</sub>/body mass) (► **Table 3**).

The percentages of performed repetitions with respect to the maximum possible number that can be completed in each set to failure when a given magnitude of MPV loss (15–75%) is reached were very similar for loads ranging from 50 to 70% 1RM (► **Table 4**). However, these percentages of performed repetitions for a given magnitude of MPV loss were progressively greater for 75, 80 and 85% 1RM, respectively (► **Fig. 2**). The CV for the percentage of performed repetitions with respect to the maximum possible number that can be completed in each set to failure ranged from 2.7 to 12.1% depending on the loss of MPV reached in the set (► **Table 2**).

A prediction equation to estimate the percentage of performed repetitions (% Rep) when a given magnitude of MPV loss is reached in an exercise set for loads of 50–70% 1RM in the BP is provided: % Rep =  $-0.00855 \cdot \text{MPV loss}^2 + 1.83311 \cdot \text{MPV loss} + 5.55281$  ( $R^2 = 0.964$ ; SEE = 5.44%). For 75% 1RM, the resulting equation was: % Rep =  $-0.00705 \cdot \text{MPV loss}^2 + 1.71404 \cdot \text{MPV loss} + 10.74584$  ( $R^2 = 0.968$ ; SEE = 5.15%), whereas for 80% 1RM the equation



► **Fig. 1** Study I. Relationship between the load magnitude and: **a** number of performed repetitions to failure; **b** relative loss of MPV over each set to failure in the bench press exercise. See text for details. The vertical error lines represent the standard deviation.

► **Table 2** Study I. Coefficient of variation (CV) for: i) number of repetitions performed at each load magnitude; and ii) the percentage of completed repetitions with respect to the maximum possible number when a given percentage of MPV loss is reached in each set to failure against the corresponding relative load.

		CV (%) for each percentage of MPV loss												
Load (% 1RM)	CV (%) for Rep	15 %	20 %	25 %	30 %	35 %	40 %	45 %	50 %	55 %	60 %	65 %	70 %	75 %
50 % (~0.93 m · s <sup>-1</sup> )	22.4	11.6	10.1	9.8	9.5	9.1	8.8	8.1	7.3	6.5	5.1	4.2	3.8	3.1
55 % (~0.86 m · s <sup>-1</sup> )	19.5	11.1	10.6	9.9	9.1	8.4	7.9	7.2	6.3	5.5	4.7	3.8	3.1	2.5
60 % (~0.79 m · s <sup>-1</sup> )	16.8	11.4	10.9	9.5	8.5	7.6	6.9	6.3	5.6	5.0	4.5	4.0	3.6	3.0
65 % (~0.71 m · s <sup>-1</sup> )	20.9	8.5	7.5	7.0	6.5	6.1	5.7	5.2	4.6	4.1	3.5	3.1	2.7	2.7
70 % (~0.62 m · s <sup>-1</sup> )	21.5	11.0	10.5	9.7	8.8	8.1	7.4	6.8	6.1	5.4	4.8	4.4	4.1	4.1
75 % (~0.54 m · s <sup>-1</sup> )	17.5	10.9	10.3	9.8	9.2	8.5	7.8	7.1	6.3	5.5	4.7	4.0	3.5	3.5
80 % (~0.47 m · s <sup>-1</sup> )	18.9	11.2	10.8	10.3	9.9	9.1	8.5	7.8	7.0	6.2	5.6	5.0	4.3	4.1
85 % (~0.39 m · s <sup>-1</sup> )	23.5	12.1	11.0	10.1	9.2	8.3	7.4	6.5	5.5	4.6	3.8	3.3		
MPV: mean propulsive velocity; Rep: number of completed repetitions in the set														
CV for the percentage of completed repetitions when 70 % and 75 % of MPV loss are reached against 85 % 1RM do not appear in the table because the maximum MPV loss that can be reached in the set against this load is approximately 65 %														

was: % Rep =  $-0.00780 \cdot \text{MPV loss}^2 + 1.72215 \text{ MPV loss} + 13.38519$  ( $R^2 = 0.965$ ;  $\text{SEE} = 5.39\%$ ). Finally, the resulting equation for 85% 1RM was: % Rep =  $-0.00813 \cdot \text{MPV loss}^2 + 1.74323 \text{ MPV loss} + 20.88282$  ( $R^2 = 0.960$ ;  $\text{SEE} = 5.75\%$ ).

## Study II

Descriptive and variability data for the 2 MNR tests performed against 60% 1RM are presented in ► **Table 5** and ► **Table 6**, respectively. No significant differences were found for any mechanical variable between trials 1 and 2 (► **Table 5**). Paired t-tests revealed no significant differences between trials for any percentage of repetitions completed at each magnitude of MPV loss. The percentages of repetitions completed had very high absolute reliability (CV: 2.1–6.6%), with lower CV values as the loss of MPV over the set increased.

## Discussion

This study aimed to analyze the pattern of repetition velocity decline during a single set to muscle failure against 8 different loads in the BP exercise. The main finding of *Study I* was that there exists a very close relationship between the relative loss of velocity in a set and the percentage of performed repetitions with respect to the maximum number that can be completed (i.e., proximity to muscle failure) (► **Fig. 2**). This is an interesting and practical finding because by monitoring repetition velocity during RT one can estimate, with considerable precision, how many repetitions are left in reserve in a given exercise set (which corresponds to the concept of 'level of effort' [8, 10, 18, 23]). In *Study II* we also found that the percentage of performed repetitions for a given magnitude of MPV loss, against a 60% 1RM load, showed a high absolute reliability (► **Table 6**).

The close relationship found between relative loss of repetition velocity and percentage of performed repetitions was very similar for loads between 50–70% 1RM (► **Fig. 2a**, ► **Table 4**), even though the number of repetitions completed against each of these relative loads was significantly different (► **Table 1**). Interestingly, for heavier loads (75%, 80% and 85% 1RM), the percentages of performed repetitions for a given magnitude of MPV loss were slightly higher than those observed against loads of 50–70% 1RM (► **Fig. 2**). It is for this reason that 4 different equations (for loads of 50–70% 1RM, 75% 1RM, 80% 1RM and 85% 1RM) to predict the percentage of performed repetitions from relative loss of MPV have been provided in the results section. These equations can be easily implemented in a spreadsheet or software application to estimate the actual level of effort being incurred in each training set, thus allowing better monitoring of the resistance exercise stimulus.

One strength of the present study was that, by monitoring repetition velocity and adjusting the actual loads to be lifted from the load (%1RM)-velocity relationship for the BP exercise [11, 24], we made sure that all participants used a very similar relative load (%1RM) in each session. In fact, the maximal difference in the fastest MPV of the set between individuals was  $0.04 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$  for the 8 loads used (► **Table 1** and ► **Table 5**), which represents a maximal variation of 2.0–3.3% in relative load [11]. Previous studies that analyzed the pattern of repetition velocity decline during a single set to muscle failure against different loads [14, 15] did not use the

► **Table 3** Study I. Correlation coefficients for the relationships observed between the number of performed repetitions in each set to failure and several anthropometric and mechanical variables.

Load (% 1RM)	BM (kg)	Height (m)	AL (m)	MPV <sub>BEST</sub> (m·s <sup>-1</sup> )	MPV <sub>LAST</sub> (m·s <sup>-1</sup> )	Loss of MPV (%)	Load (kg)	1RM <sub>est</sub> (kg)	1RM <sub>est</sub> /BM
50 % (~0.93 m·s <sup>-1</sup> )	0.20	-0.17	-0.25	0.35	0.17	-0.15	-0.17	-0.12	-0.32
55 % (~0.86 m·s <sup>-1</sup> )	-0.44 *	-0.43 *	-0.46 *	0.05	-0.34	0.34	-0.50 *	-0.35	-0.04
60 % (~0.79 m·s <sup>-1</sup> )	-0.17	-0.43 *	-0.41	0.29	0.06	-0.05	-0.61 * *	-0.53 *	-0.56 *
65 % (~0.71 m·s <sup>-1</sup> )	0.21	-0.10	-0.25	0.04	-0.21	0.21	0.18	0.41	0.48 *
70 % (~0.62 m·s <sup>-1</sup> )	-0.12	-0.50 *	-0.44 *	-0.24	-0.19	0.17	-0.45 *	-0.49 *	-0.56 *
75 % (~0.54 m·s <sup>-1</sup> )	-0.11	-0.12	-0.35	0.37	-0.17	0.22	-0.17	0.16	0.25
80 % (~0.47 m·s <sup>-1</sup> )	0.09	0.01	-0.19	0.35	-0.08	0.07	0.00	-0.02	-0.13
85 % (~0.39 m·s <sup>-1</sup> )	0.07	0.16	0.16	0.08	-0.58 * *	-0.56 * *	-0.09	0.05	-0.01
BM: body mass; AL: arm length; MPV <sub>BEST</sub> : mean propulsive velocity of the fastest (usually first) repetition in the set; MPV <sub>LAST</sub> : mean propulsive velocity of the last repetition in the set; 1RM <sub>est</sub> : estimated one-repetition maximum									
Statistically significant correlation: * p<0.05; * * p<0.01									

velocity of the first (fastest) repetition of the set to determine loading magnitude (%1RM), i.e., these studies did not check whether the actual load used in the MNR tests corresponded to the proposed or prescribed load. Furthermore, the mean velocity of the last repetition in the set was very similar for all loads used (0.12–0.14 m·s<sup>-1</sup>) in this study, and it was well in agreement with that reported for the 1RM load in this exercise (~0.14–0.15 m·s<sup>-1</sup>) [6, 11, 15], which indicates that the participants actually performed the exercise sets to muscle failure.

The average number of repetitions completed during the 8 MNR tests decreased as loading magnitude increased (► **Table 1**; ► **Fig. 1a**). This was an expected result and was in accordance with previous research [15, 22]. A finding worth noting was that the number of repetitions completed against each load (50–85 % 1RM) showed a large inter-individual variability (CV ~20%; ► **Table 2**), with the minimum number of completed repetitions representing ~50 % of the maximum number of repetitions for the 8 loads used (► **Table 1**). This finding was somewhat surprising considering that participants had RT experience and were exercising against the same relative load in each session. In general, no clear significant correlations were found between the number of completed repetitions against each load and the anthropometric or mechanical variables assessed in the present study (► **Table 3**). Previous studies also failed to find significant relationships between the number of repetitions completed against submaximal loads and 1RM or 1RM/body mass [14, 28]. However, some research has found that the number of repetitions completed showed a positive relationship with the number of capillaries per mm<sup>2</sup> of muscle cross-sectional area [28], and a negative correlation with the percentage of type II fibers [5]. Therefore, it appears that the large variability observed in the number of repetitions completed against a given load (%1RM) may depend, at least in part, on the specific muscle characteristics and training background of each participant [21].

The very close relationship observed in the present study between the relative loss of repetition velocity and the percentage of performed repetitions with respect to the maximum possible number (► **Fig. 2a**), makes it possible to determine with considerable precision the percentage of repetitions that has been completed as soon as a given percentage of velocity loss is detected. Thus, for

example, our results indicate that when an individual reaches a 30 % loss of MPV in a BP set against loads of 50–70 % 1RM, he would have completed ~50 % of the possible repetitions (leaving the other 50 % undone); if, however, the set is continued until a 50 % loss of MPV is incurred, the percentage of completed repetitions would have then increased to ~75 % (leaving only 25 % of repetitions in reserve) (► **Table 4**; ► **Fig. 2**). This represents a novel method for monitoring training volume during RT which allows us: (i) to determine the actual degree or level of effort being incurred by an athlete during each exercise set; and (ii) to equalize the level of effort for each subject during RT. The monitoring of repetition velocity is currently possible by means of the ever increasing number of commercially available portable measuring systems (linear position and velocity transducers, accelerometers and inertial measurement units).

Unlike the large inter-individual variability (CV ~20%; ► **Table 2**) observed for the number of performed repetitions against each load under study (50–85 % 1RM), the variability for the percentage of repetitions completed for a given magnitude of MPV loss in the set was much lower (CV: 2.7–11.6 %, depending on the percentage of MPV loss incurred; ► **Table 2**).

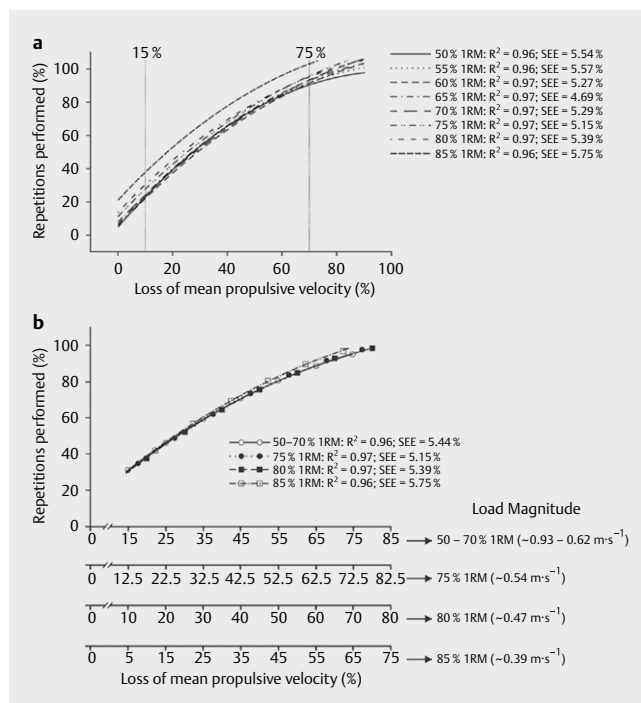
Taken together, our results highlight the practical importance of using the loss of repetition velocity for monitoring the level of effort and the training volume during resistance exercise. In conclusion, the present study has shown that: 1) there exists a very close relationship between the percentage of MPV loss incurred in a set and the percentage of performed repetitions, for loads between 50–85 % 1RM, in the BP exercise; 2) this relationship was very similar for all loads, but particularly for those ranging from 50 % to 70 % 1RM; 3) the number of repetitions performed in a set to failure against different submaximal loads (50–85 % 1RM) showed a high inter-subject variability and was, in general, not correlated with any of the anthropometric or mechanical variables assessed; and 4) the percentage of performed repetitions with respect to the maximum possible number that can be completed, when a given magnitude of MPV loss is reached in a set, showed a high absolute reliability.

## Practical applications

The results of this study contribute to improving our understanding of how the resistance exercise stimulus can be better quanti-

► **Table 4** Study I. Percentage of performed repetitions with respect to the maximum possible number that can be completed when a given magnitude of MPV loss is reached in each set to failure against loads of 50–70% 1RM.

Load (% 1RM)	Loss of MPV (%)										
	15%	20%	25%	30%	35%	40%	45%	50%	55%	60%	75%
50% (~0.93 m·s <sup>-1</sup> )	31.2	39.1	46.4	53.3	59.7	65.6	71.0	75.9	80.3	84.2	93.0
55% (~0.86 m·s <sup>-1</sup> )	31.4	39.3	46.7	53.6	60.1	66.1	71.6	76.7	81.3	85.5	95.1
60% (~0.79 m·s <sup>-1</sup> )	29.8	37.3	44.3	51.1	57.4	63.4	69.0	74.2	79.1	83.6	94.8
65% (~0.71 m·s <sup>-1</sup> )	32.1	39.8	47.1	53.9	60.4	66.4	72.0	77.2	82.0	86.3	96.9
70% (~0.62 m·s <sup>-1</sup> )	31.5	38.7	45.7	52.3	58.6	64.5	70.1	75.4	80.4	85.0	96.9
Mean ± SD	31.2 ± 0.8	38.8 ± 1.0	46.0 ± 1.1	52.8 ± 1.2	59.2 ± 1.2	65.2 ± 1.2	70.7 ± 1.2	75.9 ± 1.2	80.6 ± 1.1	84.9 ± 1.1	95.4 ± 1.6
CV (%)	2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	1.9	1.7	1.5	1.4	1.3	1.7
MPV: mean propulsive velocity; CV: coefficient of variation											



► **Fig. 2** Study I. Relationship between the magnitude of velocity loss incurred in a set and the percentage of completed repetitions with respect to the maximum –to failure– number of repetitions that can be performed in the bench press. **a** The percentage of performed repetitions for a given magnitude of velocity loss reached (from 15 to 75%) was similar for loads between 50 and 70% 1RM, but it was progressively greater for 75, 80 and 85% 1RM. **b** For loads of 75, 80 and 85% 1RM, a lower magnitude of velocity loss over the set should be allowed (~2.5, ~5 and ~10% less, respectively) in order to achieve a similar percentage of repetitions completed when compared to loads of 50–70% 1RM.

fied and more effectively monitored and prescribed. Coaches and strength and conditioning professionals usually prescribe training volume as repetitions per set. However, the present findings indicate that the number of repetitions that can be completed against a given relative load (%1RM) present a large variability between individuals. Thus, if during resistance training 2 subjects are required to perform the same number of repetitions per set, it is likely that they could be exercising with a different degree or level of effort. This is so because the percentage of repetitions completed with respect to the maximum could considerably differ for each subject. The findings of the present study suggest that, rather than prescribing a fixed number of repetitions to perform with a given load, training volume during RT should be monitored using the magnitude of velocity loss attained in each exercise set because it is closely linked to the actual level of effort being incurred. Thus, first repetition's mean velocity (which is intrinsically related to the %1RM being used) and the percent velocity loss to be reached during each set are the 2 variables that should be prescribed and monitored during an RT program aimed to optimize athletic performance. According to this novel, velocity-based approach to RT, each set should be stopped when the desired percentage of velocity loss (e. g., 15, 30 or 40%) has been reached. The magnitude of velocity loss should be set in advance depending on the specific training

► **Table 5** Study II. Descriptive variables for the 2 exercise sets to failure performed against a load of 60 % 1RM.

	MPV <sub>BEST</sub> (m·s <sup>-1</sup> )	MPV <sub>LAST</sub> (m·s <sup>-1</sup> )	Loss of MPV (%)	Rep	Load (kg)
Trial 1	0.80 ± 0.01 (0.77–0.81)	0.14 ± 0.04 (0.07–0.22)	81.4 ± 5.3 (71.3–90.9)	17.6 ± 3.7 (11–25)	49.7 ± 10.5 (28–67)
Trial 2	0.79 ± 0.01 (0.77–0.81)	0.14 ± 0.05 (0.07–0.23)	81.8 ± 5.7 (73.5–91.1)	17.6 ± 3.2 (11–25)	49.3 ± 10.7 (27–67)

Data are mean ± SD (range)

Rep: number of completed repetitions in the set; MPV<sub>BEST</sub>: mean propulsive velocity of the fastest (usually first) repetition in the set; MPV<sub>LAST</sub>: mean propulsive velocity of the last repetition in the set

► **Table 6** Study II. Percentage of repetitions completed and absolute reliability for each magnitude of MPV loss reached in a set to failure against 60 % 1RM.

Loss of MPV (%)	Trial 1	Trial 2	CV (%)
15 %	29.6 ± 4.6	30.0 ± 3.3	6.6
20 %	37.1 ± 5.2	37.4 ± 3.8	6.0
25 %	44.2 ± 5.6	44.6 ± 4.2	5.5
30 %	51.0 ± 5.8	51.3 ± 4.5	5.1
35 %	57.4 ± 5.9	57.8 ± 4.7	4.7
40 %	63.5 ± 5.9	63.8 ± 4.7	4.3
45 %	69.3 ± 5.8	69.6 ± 4.5	3.8
50 %	74.7 ± 5.5	75.0 ± 4.3	3.3
55 %	79.8 ± 5.1	80.0 ± 3.9	2.8
60 %	84.6 ± 4.6	84.7 ± 3.4	2.4
65 %	89.0 ± 4.1	89.1 ± 2.9	2.2
70 %	93.1 ± 3.7	93.1 ± 2.6	2.2
75 %	96.8 ± 3.5	96.7 ± 2.7	2.1

MPV: mean propulsive velocity; CV: coefficient of variation

goal being pursued, the particular exercise to be performed as well as the training experience and performance level of the athlete.

## Acknowledgements

There was no financial support for this project.

## Conflict of Interests

The authors declare no conflict of interest.

## References

- Atkinson G, Nevill AM. Statistical methods for assessing measurement error (reliability) in variables relevant to sports medicine. *Sports Med* 1998; 26: 217–238
- Augustsson J, Thomee R, Linden C, Folkesson M, Tranberg R, Karlsson J. Single-leg hop testing following fatiguing exercise: reliability and biomechanical analysis. *Scand J Med Sci Sports* 2006; 16: 111–120
- Bird SP, Tarpenning KM, Marino FE. Designing resistance training programmes to enhance muscular fitness: a review of the acute programme variables. *Sports Med* 2005; 35: 841–851
- Cormack SJ, Newton RU, McGuigan MR, Doyle TL. Reliability of measures obtained during single and repeated countermovement jumps. *Int J Sports Physiol Perform* 2008; 3: 131–144
- Douris PC, White BP, Cullen RR, Keltz WE, Meli J, Mondiello DM, Wenger D. The relationship between maximal repetition performance and muscle fiber type as estimated by noninvasive technique in the quadriceps of untrained women. *J Strength Cond Res* 2006; 20: 699–703
- Duffey MJ, Challis JH. Fatigue effects on bar kinematics during the bench press. *J Strength Cond Res* 2007; 21: 556–560
- Fry AC. The role of resistance exercise intensity on muscle fibre adaptations. *Sports Med* 2004; 34: 663–679
- González-Badillo JJ, Marques MC, Sánchez-Medina L. The importance of movement velocity as a measure to control resistance training intensity. *J Hum Kinet* 2011; 29A: 15–19
- González-Badillo JJ, Rodríguez-Rosell D, Sánchez-Medina L, Gorostiaga EM, Pareja-Blanco F. Maximal intended velocity training induces greater gains in bench press performance than deliberately slower half-velocity training. *Eur J Sport Sci* 2014; 1–10
- González-Badillo JJ, Rodríguez-Rosell D, Sánchez-Medina L, Ribas J, López-López C, Mora-Custodio R, Yáñez-García JM, Pareja-Blanco F. Short-term recovery following resistance exercise leading or not to failure. *Int J Sports Med* 2016; 37: 295–304
- González-Badillo JJ, Sánchez-Medina L. Movement velocity as a measure of loading intensity in resistance training. *Int J Sports Med* 2010; 31: 347–352
- Harriss DJ, Atkinson G. Ethical standards in sport and exercise science research: 2016 Update. *Int J Sports Med* 2015; 36: 1121–1124
- Hass CJ, Feigenbaum MS, Franklin BA. Prescription of resistance training for healthy populations. *Sports Med* 2001; 31: 953–964
- Iglesias E, Boulosa DA, Dopico X, Carballeira E. Analysis of factors that influence the maximum number of repetitions in two upper-body resistance exercises: curl biceps and bench press. *J Strength Cond Res* 2010; 24: 1566–1572
- Izquierdo M, González-Badillo JJ, Hakkinen K, Ibáñez J, Kraemer WJ, Altadill A, Eslava J, Gorostiaga EM. Effect of loading on unintentional lifting velocity declines during single sets of repetitions to failure during upper and lower extremity muscle actions. *Int J Sports Med* 2006; 27: 718–724
- Kraemer WJ, Ratamess NA. Fundamentals of resistance training: progression and exercise prescription. *Med Sci Sports Exerc* 2004; 36: 674–688
- Pallarés JG, Sánchez-Medina L, Pérez CE, de la Cruz-Sánchez E, Mora-Rodríguez R. Imposing a pause between the eccentric and concentric phases increases the reliability of isoinertial strength assessments. *J Sports Sci* 2014; 32: 1165–1175
- Pareja-Blanco F, Rodríguez-Rosell D, Sánchez-Medina L, Ribas-Serna J, López-López C, Mora-Custodio R, Yáñez-García JM, González-Badillo JJ. Acute and delayed response to resistance exercise leading or not leading to muscle failure. *Clin Physiol Funct Imaging* 2016; doi:10.1111/cpf.12348



- [19] Pareja-Blanco F, Rodríguez-Rosell D, Sánchez-Medina L, Sanchís-Moysi J, Dorado C, Mora-Custodio R, Yáñez-García JM, Morales-Álamo D, Pérez-Suárez I, Calbet JA, González-Badillo JJ. Effects of velocity loss during resistance training on athletic performance, strength gains and muscle adaptations. *Scand J Med Sci Sports* 2016; doi:10.1111/sms.12678
- [20] Pareja-Blanco F, Sánchez-Medina L, Suárez-Arrones L, González-Badillo JJ. Effects of velocity loss during resistance training on performance in professional soccer players. *Int J Sports Physiol Perform* 2016; doi:10.1123/ijsp.2016-0170
- [21] Richens B, Cleather DJ. The relationship between the number of repetitions performed at given intensities is different in endurance and strength trained athletes. *Biol Sport* 2014; 31: 157–161
- [22] Sakamoto A, Sinclair PJ. Effect of movement velocity on the relationship between training load and the number of repetitions of bench press. *J Strength Cond Res* 2006; 20: 523–527
- [23] Sánchez-Medina L, González-Badillo JJ. Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Med Sci Sports Exerc* 2011; 43: 1725–1734
- [24] Sánchez-Medina L, González-Badillo JJ, Pérez CE, Pallarés JG. Velocity- and power-load relationships of the bench pull vs. bench press exercises. *Int J Sports Med* 2014; 35: 209–216
- [25] Sánchez-Medina L, Pérez CE, González-Badillo JJ. Importance of the propulsive phase in strength assessment. *Int J Sports Med* 2010; 31: 123–129
- [26] Shimano T, Kraemer WJ, Spiering BA, Volek JS, Hatfield DL, Silvestre R, Vingren JL, Fragala MS, Maresh CM, Fleck SJ, Newton RU, Spreuwenberg LP, Hakkinen K. Relationship between the number of repetitions and selected percentages of one repetition maximum in free weight exercises in trained and untrained men. *J Strength Cond Res* 2006; 20: 819–823
- [27] Tan B. Manipulating resistance training program variables to optimize maximum strength in men: a review. *J Strength Cond Res* 1999; 13: 289–304
- [28] Terzis G, Spengos K, Manta P, Sarris N, Georgiadis G. Fiber type composition and capillary density in relation to submaximal number of repetitions in resistance exercise. *J Strength Cond Res* 2008; 22: 845–850



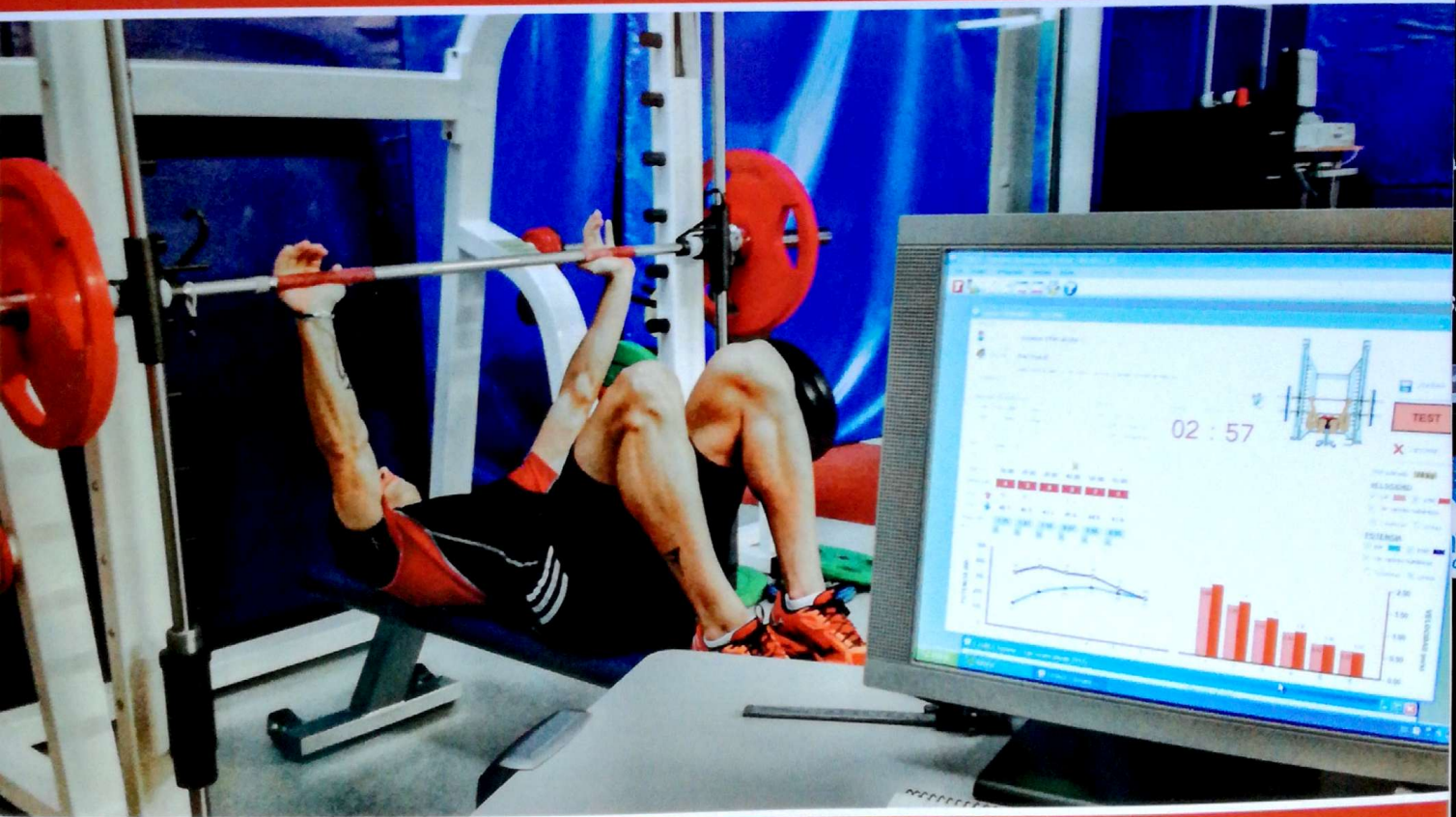
# La velocidad de ejecución como referencia para la programación, control y evaluación del entrenamiento de fuerza



Juan José González Badillo  
Luis Sánchez Medina  
Fernando Pareja Blanco  
David Rodríguez Rosell



En este libro se explican con detalle varios estudios recientes que constituyen la fundamentación teórica y experimental del empleo de la velocidad de ejecución como referencia para el control y la evaluación del entrenamiento de fuerza. Estas investigaciones han sido lideradas por el Dr. Juan José González Badillo, pionero en el uso del control de la velocidad y profundo conocedor del fenómeno deportivo. Los contenidos aquí presentados suponen un cambio de paradigma en la forma de entender el entrenamiento. El texto va dirigido a técnicos deportivos, entrenadores y preparadores físicos que trabajen en el ámbito del rendimiento físico y deportivo, pero también a estudiantes, investigadores y docentes en Ciencias de la Actividad Física y del Deporte y, en general, a cualquier persona interesada en conocer las bases científicas del entrenamiento deportivo.



PVP 35,00 €

ISBN 978-84-617-9586-4



9 788461 795864 >



Más información en [www.vbtraining.net](http://www.vbtraining.net)



# <sup>s</sup><sub>y</sub> <sup>m</sup><sub>p</sub> <sup>s</sup><sub>i</sub> <sup>u</sup><sub>m</sub> EXERNET

Red Española de Investigación en Ejercicio Físico y Salud

El Comité Científico y Organizador certifica que la contribución titulada:

*"Efecto de la perdida de velocidad dentro de la serie durante el entrenamiento de fuerza sobre la fuerza muscular, la capacidad de salto y el rendimiento en sprint"*

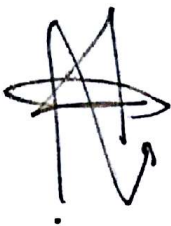
cuyo autor/es son:

David Rodriguez Rosell, Juan Manuel Yañez Garcia, Ricardo Mora Custodio, Fernando Hipolito Pareja Blanco y Juan Jose Gonzalez Badillo  
ha sido presentada como póster en el Simposio EXERNET. Investigación en Ejercicio, Salud y Bienestar: "Exercise is Medicine" celebrado en Cádiz los días 14 y 15 de octubre de 2016.

Cádiz, a 15 de octubre de 2016


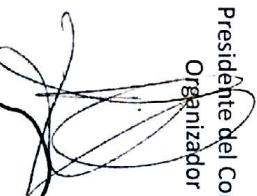
**Carmen Padilla Moledo**

Presidenta del Comité  
Organizador



**David Jiménez Pavón**

Presidente del Comité  
Organizador



**José Antonio Casajús Mallén**

Presidente de EXERNET

**José Castro Piñero**

Responsable Grupo GALENO  
CTS-158



## INTRODUCCIÓN

El entrenamiento de fuerza es uno de los métodos de entrenamiento más utilizados tanto para la mejora del rendimiento como para el desarrollo de una condición física saludable y el tratamiento de enfermedades [1]. Sin embargo, aún existe cierta controversia en relación con qué volumen de entrenamiento es el que produce mayores beneficios sobre la mejora de la condición física. Por tanto, el objetivo de nuestro estudio fue comparar el efecto de dos entrenamientos de fuerza que difieren únicamente en el volumen de entrenamiento, determinado éste a través de la pérdida de velocidad alcanzada en cada serie (10% vs. 30%) [2,3], sobre el cambio en la fuerza y la resistencia muscular, y el rendimiento en salto y velocidad en carrera.

## MÉTODO

Veinticinco hombres fueron divididos aleatoriamente en dos grupos: 10% (PV10%,  $n = 12$ ) o 30% (PV30%,  $n = 13$ ) de pérdida de velocidad en cada serie de entrenamiento. Los participantes llevaron a cabo un entrenamiento de fuerza durante 8 semanas (2 sesiones por semana) usando el ejercicio de sentadilla completa. Durante las 8 semanas de entrenamiento, la carga aumentó progresivamente desde el 70% ( $\sim 0.82 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) al 85% ( $\sim 0.60 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 1RM. Se controló la velocidad de todas las repeticiones a través de un transductor lineal de velocidad (T-Force, Dynamic Measurement System, Ergotech, Murcia, Spain). Antes y después del entrenamiento se midieron las siguientes variables: 1RM<sub>est</sub> y máximo número de repeticiones posible ante una carga que representaba el 60% de 1RM<sub>est</sub> en el test inicial en el ejercicio de sentadilla completa, altura de salto vertical (CMJ) y tiempo en un sprint de 20 m (T10 y T20).

## RESULTADOS

Hubo interacción significativa ( $p < 0.05$ ) "Test x Grupo" en favor de PV10% en las variables T10 y T20. Ambos grupos experimentales mostraron mejoras significativas ( $p < 0.001$ ) similares en la fuerza y la resistencia muscular. El grupo PV10% obtuvo mayores mejoras del rendimiento en el CMJ, el T10 y el T20 que el grupo PV30%, aunque las diferencias entre ambos grupos no fueron significativas.

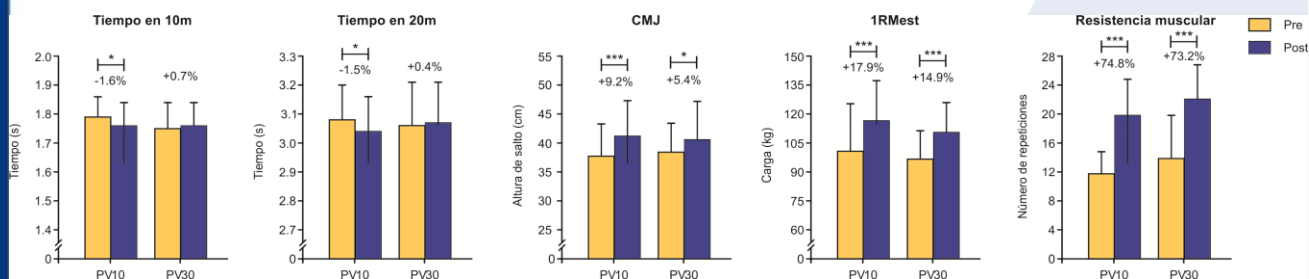


Figura 1. Cambios en las distintas variables analizadas en ambos grupos (PV10% vs. PV 30%) después de 8 semanas de entrenamiento. Diferencias estadísticamente significativas entre el pre- y el post-test: \*  $P < 0.05$ , \*\*\*  $P < 0.001$ .

## CONCLUSIONES

Nuestros resultados indican que alcanzar una menor pérdida de velocidad dentro de la serie (menor número de repeticiones) resulta en similares ganancias de fuerza y resistencia muscular. Además, parece que entrenar con un menor grado de fatiga dentro de cada serie de entrenamiento (como resultado de una menor pérdida de velocidad) produce mayores mejoras del rendimiento en diferentes acciones deportivas de alta velocidad como el salto y el sprint.

## REFERENCIAS

- [1]. American College of Sports Medicine position stand. Progression models in resistance training for healthy adults. (2009). *Med Sci Sports Exerc*, 41(3), 687-708.
- [2]. Pareja-Blanco, F., Rodríguez-Rosell, D., Sanchez-Medina, L., Sanchis-Moysi, J., Dorado, C., Mora-Custodio, R., Yáñez-García, J. M., Morales-Alamo, D., Pérez-Suárez, I., Calbet, J. A. L., & Gonzalez-Badillo, J. J. (2016). Effects of velocity loss during resistance training on athletic performance, strength gains and muscle adaptations. *Scand J Med Sci Sports*.
- [3]. Sanchez-Medina, L., & Gonzalez-Badillo, J. J. (2011). Velocity loss as an indicator of neuromuscular fatigue during resistance training. *Med Sci Sports Exerc*, 43(9), 1725-1734.